



Inventarisatie van technieken voor ontgassing van binnenvaarttankers

10 november 2023

Kenmerk R001-1292542RAX-V05

Verantwoording

Titel	Inventarisatie van technieken voor ontgassing van binnenvaarttankers
Opdrachtgever	Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving (WVL)
Projectleider	Berend Hoekstra
Auteur(s)	Reinoud van der Auweraert
Tweede lezer	Chantal Oversteegen-Vonk
Kenmerk	R001-1292542RAX-V05
Aantal pagina's	114 (exclusief bijlagen)
Datum	10 november 2023
Handtekening	Ontbreekt in verband met digitale verwerking. Dit rapport is aantoonbaar vrijgegeven.

Colofon

TAUW bv
Rijnspoor 209
Postbus 6
2900 AA Capelle aan den IJssel
T +31 10 28 86 10 0
E info.rotterdam@tauw.com

Inhoud

Executive Summary.....	7
Managementsamenvatting	11
Begrippen en afkortingen	15
1 Inleiding	18
1.1 Achtergrond.....	18
1.2 Probleemstelling en doel van het onderzoek	18
1.3 Afbakening	19
1.4 Aanpak en leeswijzer	19
2 Wettelijk kader	21
2.1 Verbod op varend ontgassen	21
2.1.1 CDNI-verdrag	21
2.1.2 ADN.....	21
2.1.3 SAB Besluit	22
2.2 Omgevingswet	22
2.2.1 Overgang naar de Omgevingswet	22
2.2.2 Systematiek van het Bal.....	23
2.2.3 Eisen aan dampverwerking.....	23
2.2.4 Beste beschikbare technieken	24
2.2.5 Zeer zorgwekkende stoffen.....	25
2.2.6 Algemene emissie-eisen.....	25
2.2.7 Op- en overslag van benzine	27
2.2.8 Gasmotor	28
2.2.9 Afvalstatus.....	29
2.2.10 Lokale milieuaspecten.....	29
2.3 BBT-conclusies	31
2.4 Circulaire economie	31
3 Uitgangspunten	33
3.1 Toelichting.....	33
3.2 Procescondities.....	33
3.2.1 Praktijkonderzoek ontgassen van binnenvaarttankers	33

3.2.2	Relatie tussen concentratie en ventilatievoud.....	34
3.2.3	Dampverzading.....	35
3.3	Gemodelleerde procesomstandigheden	36
3.4	Onderscheid tussen vaste en mobiele dampbehandeling	38
4	Technieken.....	42
4.1	Toelichting.....	42
4.2	Algemene technieken voor het behandelen van VOS	42
4.2.1	Vaste dampverwerking.....	44
4.2.2	Mobiele dampverwerking	44
4.3	Producteigenschappen in relatie tot dampverwerking	45
4.4	Dampafzuiging	46
4.4.1	Dampdebiet en verwarming	46
4.4.2	Ontgassingsduur.....	46
4.4.3	Technieken om verdamping te beperken.....	47
4.5	Gaswassing.....	47
4.6	Adsorptie	48
4.6.1	Algemeen.....	48
4.6.2	Toepassing als dampverwerkingstechniek voor ontgassing.....	49
4.7	Condensatie	50
4.7.1	Cryocondensatie	50
4.7.2	Condensatie door compressie	53
4.8	Verbranding (thermische oxidatie)	54
4.8.1	Algemeen.....	54
4.8.2	Eenvoudige naverbrander (VCU).....	55
4.8.3	Vlamloze thermische oxidatie (FTO).....	58
4.8.4	Regeneratieve thermische oxidatie (RTO).....	59
4.8.5	Katalytische oxidatie	62
4.8.6	Gasmotor	63
4.9	Technieken voor andere productgroepen	66
5	Aanvullende beoordeling van de technieken.....	67
5.1	Toelichting.....	67
5.2	Beoordelingswijze	67

5.2.1	Beoordeling van de technische aspecten en kosten.....	67
5.2.2	Integrale milieuafweging	68
5.3	Behandelen van benzinedamp.....	69
5.3.1	Rendement, validatie en bedrijfszekerheid	69
5.3.2	Neveneffecten.....	70
5.3.3	Samenvattend overzicht en weging van technieken.....	71
5.4	Behandelen van benzeendamp	72
5.4.1	Rendement, validatie en bedrijfszekerheid	72
5.4.2	Neveneffecten.....	73
5.5	Behandelen van ethanoldamp	74
5.5.1	Rendement, validatie en bedrijfszekerheid	74
5.5.2	Neveneffecten.....	74
6	Monitoring.....	76
6.1	Toelichting.....	76
6.2	Ladingtanks.....	76
6.3	Dampsterugwinning	77
6.4	Dampbehandeling	77
7	Samenvatting, conclusies en aanbevelingen	79
7.1	Achtergrond.....	79
7.2	Probleemstelling en doel van het onderzoek	79
7.3	Afbakening	80
7.4	Wettelijke kader.....	80
7.5	Dampverwerkingstechnieken	81
7.5.1	Geschikte technieken.....	81
7.5.2	BBT-geassocieerde emissieniveaus.....	81
7.5.3	Kosteneffectiviteit.....	82
7.5.4	Gevolgen voor het milieu	83
7.6	Conclusies.....	83
7.7	Aanbevelingen	84
8	Literatuur	86
Bijlage 1	Leveranciers die informatie hebben verstrekt voor het onderzoek.....	87
Bijlage 2	CDNI Besluit 2017-I-4, aanhangsel IIIa	88

Kenmerk R001-1292542RAX-V05

Bijlage 3	UN-ladingnummers en stofgroepen	92
Bijlage 4	Uittreksel van AND 2021	93
Bijlage 5	Proefnemingen met vrij ontgassen	97
Bijlage 6	Proefnemingen met dampbehandeling.....	101
Bijlage 7	Berekening van milieukosten en -baten	107
Bijlage 8	Kosteneffectiviteitsberekening	114

Executive Summary

Background: prohibition to release vapours on the inland waterways

Liquid products from the petroleum and chemical industries are transported in inland tankers. These products consist of organic substances that evaporate at ambient temperature, so-called volatile organic compounds (VOC¹). Before inland tankers can transport a product incompatible with the previous cargo, the residues and vapours of the previous cargo often have to be removed from the ship's product tanks. To do this, air is blown through the product tanks while underway, expelling the vapours to the outside air. This is called 'sailing degassing' or ventilation.

A ban on sailing degassing of a number of product groups will come into force in the Netherlands no later than 1 July 2024, in view of the upcoming international² ban on sailing degassing under the CDNI (Convention on Shipping Waste³). The ban means that it is prohibited to emit cargo vapours directly to the atmosphere. The practical consequence is that the vapours will have to be treated in a vapour treatment facility unless the cargo products are 'compatible'.

Vapour Treatment Regulations

General rules apply to emissions from vapour treatment plants as stipulated in the Environment Act ('Omgevingswet'). Customisation by the competent authority is possible based on the application of best available techniques (BAT). BAT for vapour treatment at fixed facilities at refineries, chemical industries and tank storage plants is laid down in European BAT conclusions and BREF documents. These documents show that fixed facilities can meet the applicable emission requirements. This is also evident from measurement reports of the operated installations. Due to differences in process conditions and available infrastructure, not all techniques for mobile facilities can meet the requirements that fixed facilities can meet, especially concerning the petrol vapour recovery requirement.

Problem Definition and Purpose

Both fixed and mobile facilities treat vapours from degassing ships. There was lack of clarity among various stakeholders as to whether mobile vapour treatment installations, unlike such installations at tank storage facilities and refineries, can meet the emission requirements set out in general rules. More than 50 years of knowledge on vapour handling in industry is available. However, knowledge on the best available techniques at degassing plants is currently fragmented among several parties.

The Ministry of Infrastructure and Water Management has therefore decided to establish an inventory of installations that can be used for degassing inland tankers based on the available literature, in consultation with representatives of the stakeholders involved. The aim of the study is to provide stakeholders with an overview of techniques that are currently available, including the Steering

¹ The definition of VOCs varies by legal framework; within the framework of the CDNI, the ban is applicable to hydrocarbons with a vapour pressure of at least 5 kPa at 20 °C

² Signatory countries to the CDNI convention

³ Convention on the collection, deposit and reception of waste generated during navigation on the Rhine and other inland waterways

Group on Sailing Degassing. The competent authority can also use this overview in its considerations when issuing permits for vapour-processing installations.

Scope and Approach

Vapours from the products listed in Tables I to III of the CDNI Appendix may not be discharged into the air unless the conditions regarding the permissible value for free ventilation (AVFL) are met. Regardless meeting the AVFL level, the AND poses restrictions on free ventilation, for example, degassing is not allowed in densely populated areas. The product groups considered in this document are:

- Table I: petrol⁴ or motor fuel, ethanol-petrol blends, 'petroleum distillates not elsewhere specified' (UN 1268) and benzene
- Table II: substances containing more than 10% benzene

The performance and cross media effects of mobile techniques suited to treat the vapour of these product groups have been indicated. Publicly available sources were used in the preparation of this document through literature review. Additional information was also obtained from industry associations and stakeholder representatives.

Degassing

The allowable vapour concentration in the cargo tank for free ventilation (AVFL) is defined in the aforementioned CDNI tables and corresponds to 10% of the lower explosion limit (LEL). At the start of degassing, the vapour in the cargo tank is (almost) saturated. By dilution with air, the vapour concentration decreases, whereby residual product liquid will also evaporate.

Techniques

Techniques considered BAT for mobile vapour treatment comply with the general emission limits and are commercially available for the degassing of inland tankers. Suitable techniques for mobile vapour treatment of degassing vapour are, either standalone or combined:

- Cryocondensation with vapour recovery
- Adsorption without vapour recovery
- Thermal oxidation in a simple incinerator (VCU)
- Flameless thermal oxidation (FTO)
- Regenerative thermal oxidation (RTO)

Thermal oxidation in a gas engine without exhaust gas treatment techniques is not BAT, as it cannot meet the applicable emission requirements. A gas engine with exhaust gas treatment techniques⁵ may meet the emission requirements but this needs to be proved by measurements.

⁴ Gasoline vapour: any gaseous compound which evaporates from petrol, with or without additives; petrol: any petroleum derivative, with or without additives, having a Reid vapour pressure of 27,6 kilopascals or more, which is intended for use as a fuel for motor vehicles, except liquefied petroleum gas (LPG); defined in Directive 94/63/EC of 20 December 1994 on the control of volatile organic compound (VOC) emissions resulting from the storage of petrol and its distribution from terminals to service stations

⁵ For a spark-ignition gas engine, in addition to a three-way catalytic converter, a downstream SCR is required in order to meet the NO_x emission limit for a gas engine; for a compression-ignition gas engine, a diesel particulate filter (DPF) a catalytic oxidation (DOC), an SCR and an ammonia catalyst (ASC) are required to meet the emission limit values for a gas engine

Cryocondensation is usually combined with adsorption without recovery or RTO, techniques that can guarantee the required low vapour concentration of VOCs insofar as there is an emission to the outside air via the vapour recovery unit. Adsorption without vapour recovery and an RTO are less suitable for treating high vapour concentrations.

Conclusions

The common applied and commercially available vapour recovery systems at fixed facilities, whether or not combined with RTO as post-treatment, are also suitable for degassing the Phase I and II product groups. About five techniques are suitable for mobile vapour treatment of degassing vapour from inland tankers, whether standalone or combined. These techniques are considered proven technology. In addition, these techniques are cost-effective according to the legal criteria for VOC removal cost-effectiveness.

The techniques can meet the BAT-associated emission levels set for comparable techniques. For gas engines with exhaust gas treatment techniques and the simple incinerator (VCU), this remains to be demonstrated, especially when processing substances with high benzene content.

For petrol, the environmental benefits due to avoided VOC emissions significantly exceed the environmental damage costs caused by the vapour treatment techniques. For benzene and ethanol, which are less harmful⁶ than average VOC compounds, vapour recovery is the only technique that where the environmental benefits exceed the environmental damages. Any form of thermal oxidation results in net environmental damage.

The considered techniques differ in environmental costs and benefits, where petrol vapour recovery is more favourable than combustion techniques by a factor of three⁷. This is in line with BAT 9 of the BAT conclusions on waste gas treatment in the chemical industry⁸, in which product vapour recovery is the preferred treatment method.

Recommendations

Attention and priority for circular processing through vapour recovery

It is recommended that more attention and priority be given to circularity in the treatment of cargo vapours in accordance with the waste hierarchy in Chapter 10 of the Environmental Management Act and in analogy with the vapour recovery rules for the transfer of petrol in tank terminals according to section 4.105 of the Order on Activities ('Bal'). Consider an obligation for product vapour where the condensate can be used. Given the higher costs compared to combustion, vapour recovery is unlikely to be applied for mobile treatment of inland tanker vapours if there is no legal obligation to recover the vapours.

⁶ The environmental damage price of benzene and ethanol amounts to 0,366 Euro/kg and 0,271Euro/kg, whereas the environmental damage price of non-methane VOC amounts to 2,73 Euro/kg (central value; [CE Delft, 2023]), probably due to the lower ozone creation potential (smog formation)

⁷ Calculated as the ratio of [difference of net environmental benefits other than VOC removal from combustion technology] divided by the [net environmental benefits other than VOC removal from vapour recovery]

⁸ Decision (EU) 2022/2427 of 6 December 2022 establishing the best available techniques (BAT) conclusions on industrial emissions, for common waste gas management and treatment systems in the chemical sector

Recovering the fuels from inland tankers is an appropriate step to reduce the use of primary abiotic raw materials (including fossil fuels) by 50% in 2030 on the way to the Dutch ambition of a waste-free economy in 2050. Recovery of the fuels from inland vessels is therefore strongly preferred to vapour destruction.

Determining vapour concentration in degassed cargo tanks

It is recommended to develop a generally accepted measurement protocol on how to measure the vapour concentration in relation to the AVFL, taking into account the following aspects:

- Representative point to determine the vapour concentration to the receiving facility
- Measurement time
- Verification per cargo tank in case of simultaneous degassing of multiple cargo tanks.
- Heterogeneity of cargo tanks due to air pockets or puddles
- Recording of results and approval in a report

Halogenated hydrocarbons

It emerged during the investigation that, according to representatives of Inland Navigation Association, halogenated substances are also vented during navigation. This should be investigated. If found to be correct, it is recommended that the degassing ban be extended for halogenated hydrocarbons as they are not listed in CDNI Decision 2017-I-4, Appendix IIIa. Several halogenated hydrocarbons have properties of very high concern.

Mixtures with high benzene content

Technology providers are recommended to pay special attention to the removal of benzene in mixtures with high benzene content, for example by applying catalytic oxidation for treating the exhaust gases of gas engines. The competent authority is recommended to pay attention to this aspect during licensing and include measurement requirements to verify compliance.

Gas engine with an electricity generator

It is recommended to investigate the legal and technical possibilities for allowing a gas engine that powers an electricity generator for its own electricity needs and that uses petrol vapour from the cargo tanks as fuel on an inland tanker during navigation.

Managementsamenvatting

Achtergrond: verbod op varend ontgassen

Vloeibare producten uit de aardolie- en chemische industrie worden in de binnenvaart in tankschepen vervoerd. Deze producten bestaan uit organische stoffen die bij kamertemperatuur verdampen, zogeheten vluchtige organische stoffen (VOS⁹). Voordat tankschepen een product dat niet verenigbaar is met de vorige lading kunnen vervoeren moeten de resten en dampen van de vorige lading vaak verwijderd worden uit de producttanks van het schip. Daarvoor wordt lucht door de producttanks geblazen tijdens de vaart waarbij de dampen naar de buitenlucht worden uitgestoten. Dit wordt 'varend ontgassen' of ventileren genoemd.

Een verbod op varend ontgassen van een aantal productgroepen zal uiterlijk op 1 juli 2024 in Nederland van kracht worden, gelet op het aanstaande internationale¹⁰ verbod op varend ontgassen op grond van het Scheepsafvalstoffenverdrag¹¹ (CDNI). Het verbod houdt in dat het verboden is om ladingdampen direct naar de atmosfeer uit te stoten. Het praktische gevolg daarvan is dat de dampen zullen moeten worden behandeld in een dampverwerkingsinstallatie tenzij er sprake is van verenigbaar transport ('compatibel').

Regelgeving voor dampverwerking

Op de emissies van dampverwerkingsinstallaties zijn algemene regels van toepassing zoals vastgelegd in de Omgevingswet, waarbij maatwerk door het bevoegd gezag mogelijk is op grond van de toepassing van de beste beschikbare technieken (BBT). De BBT voor dampbehandeling bij vaste installaties bij raffinaderijen, chemische industrie en tankopslagbedrijven is vastgelegd in Europese BBT-conclusies en BREF-documenten. Uit deze documenten blijkt dat vaste installaties aan de toepasselijke emissie-eisen kunnen voldoen. Dit blijkt ook uit meetrapporten van installaties die operationeel zijn. Door verschillen in procesomstandigheden en beschikbare infrastructuur kunnen niet alle technieken voor mobiele installaties de eisen halen die vaste installaties kunnen halen, met name inzake de eis tot terugwinning van benzinedamp.

Probleemstelling en doel van het onderzoek

Voor de behandeling van dampen van ontgassende schepen kunnen vaste en mobiele installaties worden ingezet. Er bestond onduidelijkheid bij diverse belanghebbenden of mobiele dampverwerkingsinstallaties, anders dan dergelijke installaties bij tankopslagbedrijven en raffinaderijen, kunnen voldoen aan de emissie-eisen die in algemene regels zijn vastgelegd. Er is meer dan vijftig jaar kennis over dampverwerking in de industrie beschikbaar. De kennis over de beste beschikbare technieken bij ontgassingsinstallaties is op dit moment echter verbrokkeld bij meerdere partijen aanwezig.

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) heeft daarop besloten een inventarisatie te laten opstellen van installaties die kunnen worden ingezet voor het ontgassen van

⁹ De definitie van VOS wisselt per wettelijk kader; binnen het kader van de CDNI geldt het verbod voor koolwaterstoffen met een dampspanning van tenminste 5 kPa bij 20 °C

¹⁰ Landen die bij het CDNI-verdrag zijn aangesloten

¹¹ Verdrag inzake de verzameling, afgifte en inname van afval in de Rijn- en binnenvaart (CDNI)

binnenvaarttankers op grond van de beschikbare literatuur, in afstemming met vertegenwoordigers van de betrokken belanghebbenden. Het doel van het onderzoek is belanghebbenden te voorzien van een overzicht van de huidig beschikbare technieken, waaronder de stuurgroep Varend Ontgassen. Tevens kan het bevoegd gezag dit overzicht betrekken in haar afwegingen bij vergunningverlening voor dampverwerkingsinstallaties.

Afbakening en aanpak

De dampen van de goederen vermeld in Tabellen I tot en met III van het Aanhangsel van CDNI-verdrag mogen niet in de lucht worden uitgestoten, tenzij aan de voorwaarden betreffende de toelaatbare waarde voor vrij ventileren (AVFL) voldaan is. Daarbij blijven ook onder die toelaatbare waarde de eisen van het ADN van toepassing die onder meer stellen dat er niet ontgast mag worden in dichtbevolkte gebieden. De in dit document beschouwde producten betreffen:

- Tabel I: benzine¹² of motorbrandstof, ethanol-benzinemengsels, 'niet elders genoemde' aardoliedestillaten (UN 1268) en benzeen
- Tabel II: stoffen die meer dan 10% benzeen bevatten

De prestaties en neveneffecten van mobiele technieken voor de handeling van de damp van oor deze productgroepen is inzichtelijk gemaakt. Bij het opstellen van dit document is gebruik gemaakt van openbaar beschikbare bronnen door literatuuronderzoek. Daarnaast is aanvullende informatie verkregen van brancheverenigingen en vertegenwoordigers van belanghebbenden.

Ontgassing

De toelaatbare dampconcentratie in de ladingtank voor vrij ventileren (AVFL) is vastgelegd in de hiervoor genoemde CDNI-tabellen en komt overeen met 10% van de onderste explosiegrens (LEL). Bij aanvang van de ontgassing is de damp in de ladingtank (nagenoeg) verzadigd. Door verdunning met lucht neemt de dampconcentratie af, waarbij tevens restanten van productvloeistof zullen verdampen.

Technieken

Technieken die als BBT voor de mobiele dampbehandeling worden gezien voldoen aan de algemene emissiegrenswaarden en zijn commercieel beschikbaar voor het ontgassen van binnenvaarttankers. Geschikte technieken voor mobiele dampverwerking van ontgassingsdamp zijn, al dan niet gecombineerd:

- Cryocondensatie met dampterugwinning
- Adsorptie zonder dampterugwinning
- Thermische oxidatie in een eenvoudige naverbrander (VCU)
- Vlamloze thermische oxidatie (FTO)
- Regeneratieve thermische oxidatie (RTO)

¹² Benzinedamp: een gasvormige, uit benzine vervluchtigende verbinding; benzine: een aardoliederivaat, met of zonder additieven, met een volgens de Reidmethode bepaalde dampdruk van 27,6 kilopascal of meer, dat voor gebruik als brandstof voor motorvoertuigen is bestemd, met uitzondering van vloeibaar petroleumgas (LPG); Definitie volgens artikel 1 van de Benzinerichtlijn: Richtlijn 94/63/EG van 20 december 1994 betreffende de beheersing van de uitstoot van vluchtige organische stoffen (VOS) als gevolg van de opslag van benzine

De thermische oxidatie in een gasmotor zonder nabehandelingstechnieken is geen BBT, want deze kan niet aan de toepasselijke emissie-eisen voldoen. Van een gasmotor met nageschakelde technieken¹³ moet worden aangetoond dat aan de eisen kan worden voldoen.

Cryocondensatie wordt gebruikelijk gecombineerd met adsorptie zonder terugwinning of RTO, technieken waarmee de vereiste lage dampconcentratie aan VOS kan worden gegarandeerd voor zover er sprake is van een emissie naar de buitenlucht via de dampverwerkingsinstallatie. Adsorptie zonder dampterugwinning en een RTO zijn minder geschikt om hoge dampconcentraties te behandelen.

Conclusies

De gebruikelijke vaste dampterugwinningsinstallaties die toegepast worden en commercieel beschikbaar zijn, al dan niet aangevuld met een RTO, zijn ook geschikt voor het ontgassen van de productgroepen van fase I en II. Een vijftal technieken zijn geschikt voor mobiele dampverwerking van ontgassingsdamp van binnenvaarttanks, al dan niet gecombineerd. Deze technieken worden beschouwd als bewezen techniek. Daarnaast zijn deze technieken kosteneffectief volgens het wettelijk afwegingsgebied voor VOS. De technieken kunnen voldoen aan de BBT-geassocieerde emissieniveaus die gesteld worden aan vergelijkbare technieken. Voor de gasmotor met aanvullende reinigingstechnieken en de eenvoudige naverbrander (VCU) moet dit nog worden aangetoond, met name bij de verwerking van stoffen met hoge benzeenconcentraties.

Voor benzine geldt dat de milieubaten door de vermeden VOS-uitstoot aanzienlijk groter zijn dan de milieuschadeprijzen door de inzet van de dampbehandelingstechnieken. Voor benzeen en ethanol, die minder schadelijk¹⁴ zijn de gemiddelde VOS-stof, geldt dat alleen bij dampterugwinning de milieubaten groter zijn dan de milieuschade. Elke vorm van thermische oxidatie leidt hierbij tot netto milieuschade.

De beschouwde technieken verschillen in de maatschappelijke kosten en baten, waar benzine-dampterugwinning een factor drie¹⁵ gunstiger is dan de verbrandingstechnieken. Dit is in lijn met de BBT 9 van de BBT-conclusies afgasbehandeling in de chemische industrie [EU 2022/2427], waarin het terugwinnen van productdamp de voorkeursbehandelingsmethode is.

¹³ Voor een gasmotor met vonkontsteking is, aanvullend op een driewegkatalysator, een nageschakelde SCR nodig om te kunnen voldoen aan de NO_x-emissiegrenswaarde voor een gasmotor; voor een gasmotor met compressieontsteking zijn een roefilter (DPF), een katalytische oxidatie (DOC), een SCR en een ammoniakkatalysator (ASC) nodig om te kunnen voldoen aan de emissiegrenswaarden voor een gasmotor

¹⁴ De milieuprijs van benzeen en ethanol bedraagt 0,366 euro/kg en 0,271 euro/kg, terwijl de milieuschadeprijs van niet-methaan VOS 2,73 euro/kg bedraagt (centrale waarde; [CE Delft, 2023]), waarschijnlijk vanwege het lagere ozonvormend vermogen (smog)

¹⁵ Berekend als verhouding van [verschil van netto milieubaten anders dan VOS-verwijdering van de verbrandingstechniek] gedeeld door de [netto milieubaten anders dan VOS-verwijdering van dampterugwinning]. De methode van milieukosten/-baten is robuust voor de gangbare luchtverontreinigende stoffen zoals VOS, NO_x, CO en benzeen, welke zijn beschouwd. Volgens de huidige inzichten wordt schade van luchtverontreiniging op volksgezondheid en milieu vooral veroorzaakt door de uitstoot van fijn stof, NO_x en VOS. Van alle zeer zorgwekkende stoffen is benzeen de stof die het meeste voorkomt in de producten van lijst I en lijst II en de damp hiervan. Benzeen evenals andere ZZS in de damp van deze producten zijn niet geïdentificeerd als persistent of bioaccumulerend.

Aanbevelingen*Aandacht en prioriteit voor circulair verwerken door dampterugwinning*

Aanbevolen wordt om meer aandacht en prioriteit te geven aan circulariteit bij het behandelen van ladingdampen overeenkomstig de afvalhiërarchie in hoofdstuk 10 van de Wet milieubeheer en in analogie met de dampterugwinningsregels voor de overslag van benzine in tankterminals volgens Bal paragraaf 4.105. Overweeg een verplichting tot dampterugwinning voor productdamp waarvan het dampcondensaat een nuttige toepassing kan krijgen. Zonder een verplichting is het weinig waarschijnlijk dat damp zal worden teruggewonnen gelet op de hogere kosten.

Terugwinnen van de brandstoffen uit binnenvaartschepen is een passende stap om het gebruik van primaire abiotische grondstoffen (waaronder fossiele grondstoffen) met 50% te verminderen in 2030 op weg naar de Nederlandse ambitie van een economie zonder afval in 2050. Terugwinnen van de brandstoffen uit binnenvaartschepen heeft daarom op milieutechnische gronden en vanuit beleidsoverwegingen de voorkeur boven vernietiging van damp.

Bepalen van de dampconcentratie in de ontgaste ladingtanks

Aanbevolen wordt om een algemeen geaccepteerd meetprotocol te ontwikkelen over hoe de dampconcentratie te meten in relatie tot de AVFL, rekening houdende met de volgende aspecten:

- Representatief punt om de dampconcentratie naar de ontvangstinrichting te bepalen
- Meetduur
- Verificatie per ladingtank in het geval van het gelijktijdig ontgassen van meerdere ladingtanks.
- Heterogeniteit van ladingtanks door luchtpockets of plassen
- Vastlegging van resultaten en goedkeuring in een verslag

Gehalogeneerde koolwaterstoffen

Tijdens het onderzoek is gebleken dat volgens de vertegenwoordigers van de Binnenvaart er ook gehalogeneerde stoffen worden geventileerd tijdens de vaart. Dit dient te worden onderzocht. Indien blijkt dat dit juist is, wordt aanbevolen om het ontgassingsverbod uit te breiden voor gehalogeneerde koolwaterstoffen aangezien deze niet zijn genoemd in de lijsten van CDNI Besluit 2017-1-4, aanhangsel IIIa. Verscheidene gehalogeneerde koolwaterstoffen hebben zeer zorgwekkende eigenschappen.

Mengsels met hoog benzeengehalte

De leveranciers van technieken worden aangeraden bijzondere aandacht te besteden aan de verwijdering van benzeen in mengsels met een hoog benzeengehalte, bijvoorbeeld door het toepassen van oxidatiekatalysatoren bij gasmotoren. Het bevoegde gezag wordt aanbevolen om hier in de vergunningverlening aandacht aan te besteden en heldere meetverplichtingen over op te nemen.

Gasmotor als aandrijving voor een elektriciteitsgenerator

Aanbevolen wordt om de juridische en technische mogelijkheden te onderzoeken van een gasmotor met een elektriciteitsgenerator die tijdens de vaart van een binnenvaarttanker de benzinedamp van de ladingtanks gebruikt om te voorzien in de eigen elektriciteitsbehoefte.

Begrippen en afkortingen

ADN	ADN 2023 - European Agreement concerning the International Carriage of Dangerous Goods by Inland Waterways
ASC	Ammoniakkatalysator (ammonia slip catalyst)
AVFL	Toelaatbare waarde voor vrij ventileren (acceptable free ventilation limit)
Bal	Besluit activiteiten leefomgeving
BBT	Beste beschikbare technieken
BBT-conclusies afgasbehandeling	Uitvoeringsbesluit (EU) 2022/2427 van 6 december 2022 voor gemeenschappelijk(e) behandeling en beheer van afgassen in de chemiesector (WGC)
Benzine	Een aardoliederivaat, met of zonder additieven, met een volgens de Reidmethode bepaalde dampdruk van 27,6 kilopascal of meer, dat voor gebruik als brandstof voor motorvoertuigen is bestemd, met uitzondering van vloeibaar petroleumgas (LPG); referentie: Definitie volgens artikel 1 van de Benzinerichtlijn: Richtlijn 94/63/EG van 20 december 1994 betreffende de beheersing van de uitstoot van vluchtige organische stoffen (VOS) als gevolg van de opslag van benzine
Benzinedamp	Een gasvormige, uit benzine vervluchtigende verbinding; referentie: Definitie volgens artikel 1 van de Benzinerichtlijn: Richtlijn 94/63/EG van 20 december 1994 betreffende de beheersing van de uitstoot van vluchtige organische stoffen (VOS) als gevolg van de opslag van benzine
CDNI	Verdrag inzake de verzameling, afgifte en inname van afval in de Rijn- en binnenvaart; Besluit CDNI 2017-I-4: Bepalingen inzake de behandeling van gasvormige restanten van vloeibare lading (dampen)
CO	Koolmonoxide
CxHy	Koolwaterstoffen; bepaald met een FID
DOC	Dieseloxydatiekatalysator (diesel Oxidation Catalyst)
DPF	Roetfilter (diesel particulate filter)

Kenmerk R001-1292542RAX-V05

DVI	Dampverwerkingsinstallatie
DVPE	De dampspanning van de vloeistof bij 37,8°C bepaald volgens EN 13016-1. Deze methode geeft de gelijkwaardige droge dampdruk, 'calculated dry vapour pressure equivalent' (DVPE) en is vergelijkbaar met de 'Reid Vapour Pressure' (RVP) maar dan op watervrije basis.
EDC	1,2-dichloorethaan
FID	Vlamionisatiedetector/-detectie
FTO	Vlamloze thermische oxidatie
HVO	Gehydrogeneerde plantaardige oliën (hydrotreated vegetable oils)
IenW	Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat
KO	Katalytische oxidatie
LEL	Onderste explosiegrens
MVP, MVP2	Stofklasse van minimalisatieverplichte stoffen
MWth	Megawatt, nominaal thermisch ingangsvermogen
N.E.G.	Niet elders genoemd
n.v.t.	Niet van toepassing
NEN-EN 12919	Emissies van stationaire bronnen - Bepaling van de massaconcentratie van totaal gasvormig organisch koolstof in lage concentraties in verbrandingsgassen - Continue methode met vlamionisatiedetector
NOx	Stikstofoxiden, uitgedrukt als stikstofdioxide
NSCR	Selectieve niet-katalytische reductie, een chemisch proces zonder katalysator dat wordt gebruikt om de rookgassen die ontstaan bij een verbrandingsproces te ontdoen van stikstofoxiden (NOx) door het inspuiten van ureum of ammoniak in de verbrandingskamer
O ₂	Zuurstof als molecule
ORC	Organische rankinecyclus
P10	Tiende percentiel van de klein naar groot geordende resultaten; P10 is een getal waarbij 10% van de resultaten kleiner is of eraan gelijk en 90% groter of eraan gelijk.

Kenmerk R001-1292542RAX-V05

P90	Negentigste percentiel van de klein naar groot geordende resultaten; P90 is een getal waarbij 90% van de resultaten kleiner is of eraan gelijk en 10% groter of eraan gelijk
ppm	Parts per million (aantal delen per miljoen; maat voor concentratie in bijvoorbeeld een gasmengsel); 1 ppm komt overeen met 0,001 ‰ en 0,00001%
SAB	Scheepsafvalstoffenbesluit Rijn- en binnenvaart
SCR	Selectieve katalytische reductie, een chemisch proces met behulp van een katalysator dat wordt gebruikt om de rookgassen die ontstaan bij een verbrandingsproces te ontdoen van stikstofoxiden (NOx) door het inspuiten van bijvoorbeeld een ureummengsel in de uitlaatgassen
UN nummer	Nummer bestaande uit vier cijfers dat goederen of voorwerpen identificeert overeenkomstig de UN-modelvoorschriften; de UN-modelvoorschriften zijn te vinden op de website van de UNECE (versie 23 van 10-08-2023)
VCU	Eenvoudige naverbrander uitgevoerd als een omsloten fakkel (vapor combustion unit)
VRU	Damperugwinningsinstallatie (vapor recovery unit)
Ventilatievoud	Ventilatievoud geeft aan hoeveel keer het volume van de lading-tank is geventileerd, bijvoorbeeld een ventilatievoud van 2 geeft dan het geventileerd volume twee keer het tankvolume bedraagt.
VOS	Vluchtige organische stoffen; de grens voor de vluchtigheid van VOS is bepaald in wet- en regelgeving en verschilt per wettelijk kader. Binnen het kader van de CDNI geldt dat stoffen met een dampspanning van minder dan 5 kPa bij 20 °C buiten het ontgasingsverbod vallen
ZZS	Zeer zorgwekkende stoffen zoals bepaald in de Nederlandse wetgeving

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

Vloeibare producten uit de aardolie- en chemische industrie worden in de binnenvaart in tankschepen vervoerd. Deze producten bestaan uit organische stoffen die bij kamertemperatuur verdampen, zogeheten vluchtige organische stoffen (VOS). Voordat tankschepen een product dat niet verenigbaar is met de vorige lading kunnen vervoeren of voordat of voordat schepen naar de werf moeten, moeten de resten en dampen van de vorige lading vaak verwijderd worden uit de producttanks van het schip. Daarvoor wordt lucht door de producttanks geblazen tijdens de vaart waarbij de dampen naar de buitenlucht worden uitgestoten. Dit wordt 'varend ontgassen' of ventileren genoemd. Er is een groot scala aan producten dat vervoerd wordt, maar de meerderheid van de vervoerde stoffen bestaat uit brandstoffen en nafta. Daarnaast worden ook specifieke chemische stoffen vervoerd, waaronder kankerverwekkende stoffen zoals benzeen.

Een verbod op varend ontgassen van een aantal productgroepen zal uiterlijk op 1 juli 2024 van kracht worden. De dampen van deze producten die vrijkomen uit de producttanks van binnenvaarttankers zullen dan moeten worden behandeld in dampverwerkingsinstallaties. Op de emissies van dampverwerkingsinstallaties zijn algemene regels van toepassing, waarvan het bevoegd gezag gemotiveerd kan afwijken. De toepassing van de beste beschikbare technieken (BBT) is daarbij van belang. Zoals bijvoorbeeld in de Omgevingswet toegelicht kent het begrip BBT twee facetten, namelijk het technische aspect om met een techniek een lage milieubelasting te bereiken en een economisch aspect waarbij de kosten haalbaar zijn binnen de industriële context. Meerdere technieken kunnen in aanmerking komen als BBT.

1.2 Probleemstelling en doel van het onderzoek

Voor de behandeling van dampen van ontgassende schepen kunnen vaste en mobiele installaties worden ingezet. Er bestond onduidelijkheid bij diverse belanghebbenden of mobiele dampverwerkingsinstallaties, anders dan dergelijke installaties bij tankopslagbedrijven en raffinaderijen, kunnen voldoen aan de emissie-eisen die in algemene regels zijn vastgelegd. Er is meer dan vijftig jaar kennis over dampverwerking in de industrie beschikbaar. De kennis over de beste beschikbare technieken bij ontgassingsinstallaties is op dit moment echter verbrokkeld bij meerdere partijen aanwezig.

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) heeft daarop besloten een inventarisatie te laten opstellen van installaties die kunnen worden ingezet voor het ontgassen van binnenvaarttankers op grond van de beschikbare literatuur, in afstemming met vertegenwoordigers van de betrokken belanghebbenden. Het doel van het onderzoek is belanghebbenden te voorzien van een overzicht van de huidige en mogelijke beschikbare technieken, waaronder de stuurgroep Varend Ontgassen. Tevens kan het bevoegd gezag dit overzicht betrekken in haar afwegingen bij vergunningverlening voor dampverwerkingsinstallaties.

1.3 Afbakening

Het onderzoek is gericht op de productgroepen van invoeringsfase I en II van het verbod op varende ontgassen. Daarnaast is kort stilgestaan bij de productgroepen van invoeringsfase III.

Zowel vaste als mobiele installaties kunnen worden ingezet voor het behandelen van de dampen van ontgassende schepen. Voor vaste installaties is veel geregeld, en er zijn ook installaties die dampbehandeling kunnen toepassen voor ontgassende schepen en die voldoen aan de algemene emissie-eisen en daarmee aan BBT. Dit blijkt uit de toepasselijke BREF documenten. Ook uit beschikbare meetrapporten van reeds geïnstalleerde installaties is gebleken dat installaties aan de toepasselijke emissie-eisen kunnen voldoen. BBT. Deze technieken kunnen echter niet zonder meer als BBT worden bestempeld voor op mobiele ontgassing door verschillende procesomstandigheden en beschikbare infrastructuur. De stand van de techniek voor vaste dampverwerkingsinstallaties wordt beknopt besproken, maar de inventarisatie van technieken is met name gericht op mobiele dampverwerking omdat voor vaste installaties de BBT duidelijk is. Daarbij zijn de verschillen tussen vaste en mobiele dampverwerkingsinstallaties voor het ontgassen van schepen aangegeven.

Het is gebruikelijk om aan een kade op de wal de dampen van het ontgassen mobiel te verwerken maar dit is ook mogelijk op het water uit te voeren. Technisch zijn er geen verschillen zodat dit niet nader is uitgewerkt.

De toepasbaarheid van een techniek op een bepaalde locatie is afhankelijk van lokale omstandigheden zoals ruimte voor extra stikstofbelasting, geluidsruimte of de mogelijkheid tot energie-hergebruik. Lokale milieuaspecten zijn niet specifiek beschouwd. De beschouwde technieken zijn beperkt tot technische maatregelen en bijbehorende monitoring. Overige vormen van technieken zoals organisatorische zijn niet beschouwd.

1.4 Aanpak en leeswijzer

De emissie-eisen zoals die gesteld zijn in de wetgeving zijn als uitgangspunt genomen voor BBT. Als eerste stap is in hoofdstuk 2 een overzicht gegeven van de eisen voor zover die van belang zijn voor het bepalen van BBT. De tweede stap gaat in hoofdstuk 3 in op de procescondities van de te verwerken damp. Daarbij zijn kenmerkende condities aangegeven van producten die model staan voor de te beschouwen productgroepen. Tevens is de vergelijking gemaakt tussen dampbehandeling in mobiele en vaste installaties. De derde stap beschouwt in hoofdstuk 4 de technieken, waarbij eerst alle technieken voor het behandelen van VOS zijn gepresenteerd om vervolgens een aantal geschikte technieken te kiezen voor nadere beoordeling. De beoordeling in hoofdstuk 5 vormt de vierde stap. Voor de productgroepen is per geselecteerde techniek de volgende informatie inzichtelijk gemaakt:

- Technieken met rendement, restconcentratie en kosten
- Neveneffecten

De controle op de goede werking is in hoofdstuk 6 over monitoring behandeld. De samenvatting met conclusies is in hoofdstuk 7 gepresenteerd.

Bij het opstellen van dit document is gebruik gemaakt van openbaar beschikbare bronnen door literatuuronderzoek. Daarnaast is aanvullende informatie verkregen van brancheverenigingen en vertegenwoordigers van belanghebbenden. In bijlage 1 is opgegeven welke leveranciers aanvullende gegevens over hun techniek ter beschikking van het onderzoek hebben gesteld.

2 Wettelijk kader

2.1 Verbod op varend ontgassen

2.1.1 CDNI-verdrag

Het varend ontgassen wordt internationaal verboden door middel van een wijziging van het Verdrag inzake de verzameling, afgifte en inname van afval in de Rijn- en binnenvaart (CDNI). De verdragswijziging¹⁶ zal naar verwachting op korte termijn door alle deelnemende landen worden geratificeerd en daarmee aangenomen. De stoffen waarvoor het ontgassen naar de open lucht op een zeker moment zal worden verboden zijn vermeld in Aanhangsel IIIa van het CDNI-verdrag. De kern van dit aanhangsel is als bijlage 1 opgenomen. Het verbod houdt in dat het verboden is om ladingdampen direct naar de atmosfeer uit te stoten. Het praktische gevolg daarvan is dat de dampen zullen moeten worden behandeld in een dampverwerkingsinstallatie, tenzij sprake is van verenigbaar transport ('compatibel').

De invoering van het verbod is voorzien in 3 fasen:

- Fase I betreft dampen van benzine¹⁷ of motorbrandstof, ethanol-benzinemengsels, 'niet elders genoemde' aardoliedestillaten (UN 1268) en benzeen
- Fase II betreft de dampen van stoffen die meer dan 10% benzeen bevatten
- Fase III betreft de dampen van dertien aanvullende stoffen, ongeacht het benzeengehalte

De toelaatbare waarde voor vrij ventileren (AVFL) bedraagt ca. 0,1% v/v van de concentratie van de dampen in de ladingtank, wat overeenkomt met 10% van de onderste explosiegrens (LEL). Stoffen met een dampspanning van minder dan 5 kPa bij 20 °C vallen buiten het verbod.

2.1.2 ADN

De wijziging van het CDNI moet in samenhang worden gezien met de Europese overeenkomst voor het internationale vervoer van gevaarlijke goederen over de binnenwateren (ADN) van de Economische Commissie voor Europa van Verenigde Naties. Paragraaf 7.2.3.7 van ADN 2021 stelt regels¹⁸ aan het ontgassen van lege of geloste ladingtanks en laad- en losleidingen. De volledige tekst van deze paragraaf is in de bijlage opgenomen.

Ontgassen tijdens de vaart is alleen toegestaan indien, onder andere:

- Ontgassen op de door de bevoegde autoriteit toegelaten plaatsen niet praktisch is
- Het uitgeblazen mengsel op de plaats van uittreding niet meer dan 10 % van de onderste explosiegrens (LEL) mag bedragen

¹⁶ CDNI Besluit 2017-I-4

¹⁷ Benzinedamp: een gasvormige, uit benzine vervluchtigende verbinding; benzine: een aardoliederivaat, met of zonder additieven, met een volgens de Reidmethode bepaalde dampdruk van 27,6 kilopascal of meer, dat voorgebruik als brandstof voor motorvoertuigen is bestemd, met uitzondering van vloeibaar petroleumgas (LPG); Definitie volgens artikel 1 van de Benzinerichtlijn: Richtlijn 94/63/EG van 20 december 1994 betreffende de beheersing van de uitstoot van vluchtige organische stoffen (VOS) als gevolg van de opslag van benzine

¹⁸ Ook relevant is paragraaf 7.2.3.7.0, luidende: 'Het ontgassen van lege of geloste ladingtanks en laad- en losleidingen in de atmosfeer of naar ontvangstinrichtingen is toegestaan onder de hierna genoemde voorwaarden, doch slechts indien en voor zover zulks niet verboden is op grond van andere wettelijke vereisten.' Als het CDNI-verbod in werking treedt, mag dus niet meer ontgast worden naar de atmosfeer (het is dan verboden 'op grond van andere wettelijke vereisten').

- De bemanning niet wordt blootgesteld aan een concentratie van gassen en dampen die nationaal aanvaarde blootstellingsniveaus overschrijdt
- Dit niet in de nabijheid van sluizen, inclusief hun voorhavens, onder bruggen of in dichtbevolkte gebieden plaatsvindt

Ontgassen naar een erkende ontvangstinrichting (dampverwerkingsinstallatie) is ook onderhevig aan regels, zoals:

- Het is verboden te ontgassen naar een mobiele ontvangstinrichting terwijl een ander schip bezig is met ontgassen naar dezelfde inrichting
- Ontgassen naar een mobiele ontvangstinrichting aan boord, is verboden
- Ontgassingsactiviteiten moeten worden onderbroken tijdens een onweersbui
- De toestand gasvrij mag slechts worden verklaard en gecertificeerd door een persoon erkend door de bevoegde autoriteit

2.1.3 SAB Besluit

Het verbod is inmiddels ook opgenomen in het Nederlandse Scheepsafvalstoffenbesluit (SAB¹⁹) en ligt klaar om inwerking te treden. De minister van Infrastructuur en Waterstaat heeft besloten om het aangepaste Scheepsafvalstoffenbesluit – met daarin het binnen het CDNI afgesproken ontgassingsverbod – uiterlijk in werking te laten treden op 1 juli 2024²⁰.

De kern van de aanpassingen van het SAB is dat dampen van vervluchtigende vloeibare lading niet langer direct naar de atmosfeer mogen worden uitgestoten. Het uitstoten van dampen is verboden tenzij in het SAB anders is bepaald.

Conform het bovengenoemd CDNI-besluit tot wijziging van het verdrag is gekozen voor een gefaseerde invoering van het ontgassingsverbod. Achtergrond is dat op termijn voldoende geschikte voorzieningen operationeel moeten zijn om aan het verbod gevolg te kunnen geven.

2.2 Omgevingswet

2.2.1 Overgang naar de Omgevingswet

Op 1 januari 2024 zal de Omgevingswet in werking treden, waarmee het Activiteitenbesluit als kader voor dampverwerking zal komen te vervallen. Het verbod op varende ontgassen geldt nog niet algemeen in Nederland en zal naar verwachting per 1 juli 2024 in werking treden. De juridische situatie in 2024 is dan ook beschouwd, dat wil zeggen na de overgang naar de Omgevingswet waarbij voor ontgassingsinstallaties vooral de Rijksregels voor milieu van het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal) en de Omgevingsregeling van belang zijn. Onder de Omgevingswet wordt lokale afweging en lokale regelgeving belangrijker. Veel lokale regels komen in het omgevingsplan van de gemeente.

¹⁹ Besluit van 28 mei 2020 tot wijziging van het Scheepsafvalstoffenbesluit Rijn- en binnenvaart in verband met de invoering van een ontgassingsverbod op de binnenwateren in het Verdrag inzake de verzameling, afgifte en inname van afval in de Rijn- en binnenvaart (CDNI); Staatsblad 2020, 170

²⁰ Besluit van 15 mei 2023, houdende vaststelling van het tijdstip van inwerkingtreding van het Besluit van 28 mei 2020 tot wijziging van het Scheepsafvalstoffenbesluit Rijn- en binnenvaart in verband met de invoering van een ontgassingsverbod op de binnenwateren in het Verdrag inzake de verzameling, afgifte en inname van afval in de Rijn- en binnenvaart (CDNI); Staatsblad 2023, 200

2.2.2 Systematiek van het Bal

Het bevoegd gezag zal elke situatie afzonderlijk moeten beoordelen op de van toepassing zijnde emissie-eisen vanuit de Rijksregels in het Bal en of om ze in de omgevingsvergunning of in lokale regels te stellen. In tegenstelling tot de huidige wetgeving is tijdelijkheid van een mobiele installatie geen criterium meer voor het onder Rijksmilieuregels van het Bal vallen van dampbehandeling. De gemeente zal in de meeste gevallen²¹ het bevoegd gezag vormen voor de activiteit van het behandelen van damp afkomstig van het ontgassen van binnenvaartanker in een mobiele installatie.

In hoofdstuk 3 van het Bal worden de milieubelastende activiteiten aangewezen. In hoofdstuk 3 van het Bal staan bedrijfstakken, maar ook bedrijfstakoverstijgende (vaak losse) activiteiten. Een ontgassingsinstallatie staat hier echter niet in. Wel hoort die vaak bij een andere activiteit (of activiteiten) in hoofdstuk 3, zoals (een bestaande) raffinaderij, of bedrijfstakoverstijgende activiteiten als bepaalde grootschalige opslag, stookinstallatie of handelingen met afval.

Het Bal geeft in hoofdstuk 4 in verschillende paragrafen inhoudelijke (emissie-) eisen voor specifieke activiteiten. Alleen voor benzinedamptergewinningsinstallaties zijn er specifieke regels. Voor dampbehandeling of terugwinning van andere stoffen zijn er geen specifieke eisen in Bal hoofdstuk 4. Wel zijn er algemene eisen voor luchtmissies, in een luchtparagraaf in Bal hoofdstuk 5.

De systematiek van het Bal is zodanig, dat de onderdelen van hoofdstuk 4 én 5 alleen gelden als een of meer van de paragrafen van hoofdstuk 3 van toepassing zijn én als de hoofdstuk 4 of 5 paragraaf is 'aangewezen' in de desbetreffende paragraaf van hoofdstuk 3.

Welke paragrafen van hoofdstuk 4 en 5 zijn aangewezen, en dus gelden, verschilt per paragraaf in hoofdstuk 3. Het gaat te ver om hier alle mogelijke opties te noemen, laat staan uit te werken. Er zijn zo'n 7 mogelijk relevante paragrafen in hoofdstuk 3. De meeste hiervan (5 van de 7) wijzen de luchtparagraaf aan. Naast luchteisen gelden er andere eisen, afhankelijk van de activiteit genoemd in hoofdstuk 3.

2.2.3 Eisen aan dampverwerking

De volgende voor ontgassingsinstallaties relevante paragrafen in hoofdstuk 4 en 5 bevatten lucht-emissie-eisen, die overigens alleen gelden als deze paragrafen in hoofdstuk 3 zijn aangewezen:

- Specifieke eisen voor ontgassingsinstallaties zijn enkel voor benzine bij benzineterminals²² gesteld (zie paragraaf 2.2.7)
- Voor een gasmotor²³ in combinatie met een generator zijn er eisen voor NO_x- en C_xH_y-emissies voor een stookinstallatie (zie paragraaf 2.2.8)
- In veel andere gevallen of aanvullend gelden de algemene luchteisen uit de luchtparagraaf van Bal H5 (zie 2.2.6). Deze gelden rechtstreeks en komen niet in de vergunning

²¹ Tenzij er sprake is van provinciaal belang of bijvoorbeeld gevaarlijk afval én IPPC-installatie of Seveso-installatie.

²² Een installatie die voor de opslag en het laden van benzine in tankwagens, tankwagons of schepen wordt gebruikt, met inbegrip van alle opslagvoorzieningen op het terrein van de installatie (Richtlijn 94/63/EG van 20 december 1994 betreffende de beheersing van de uitstoot van vluchtige organische stoffen (VOS) als gevolg van de opslag van benzine en de distributie van benzine vanaf terminals naar benzinestations)

²³ Die als autonome stookinstallatie worden geëxploiteerd; een stookinstallatie is een technische eenheid waarin brandstoffen worden geoxideerd om de warmte die zo wordt opgewekt te gebruiken

- De paragraaf over zeer zorgwekkende stoffen (ZZS) in hoofdstuk 4 geeft eisen voor emissies naar lucht en water. De paragraaf is niet overal aangewezen, maar voor ZZS geldt ook de zorgplicht (zie 2.2.5)

Het bevoegd gezag kan bij maatwerk in de vergunning gemotiveerd afwijken van de geldende eisen in het Bal, tenzij dit in de bewuste paragraaf is ingeperkt.

Als het Bal (afhankelijk van de aangewezen paragrafen dus) geen of slechts deels emissie-eisen geeft, dan moet het bevoegd gezag die eisen opnemen in de vergunning op basis van de zorgplicht van het Bal. Hierbij kan worden aangesloten bij de H4 en 5 eisen.

Als – naar oordeel van het lokale bevoegd gezag – geen enkele paragraaf van hoofdstuk 3 van het Bal van toepassing is, dan kan de gemeente eisen stellen in het omgevingsplan op basis van de zorgplicht van de Omgevingswet²⁴.

2.2.4 Beste beschikbare technieken

De regels die uit Omgevingswet voortvloeien strekken er in ieder geval toe dat de beste beschikbare technieken (BBT) moeten worden toegepast (artikel 4.22). Beste beschikbare technieken zijn in de bijlage bij artikel 1.1 van de Ow als volgt gedefinieerd:

het meest doeltreffende en geavanceerde ontwikkelingsstadium van de activiteiten en exploitatiemethoden waarbij de praktische bruikbaarheid van speciale technieken om het uitgangspunt voor de emissiegrenswaarden en andere vergunningsvoorwaarden te vormen is aangetoond, met als doel emissies en gevolgen voor het milieu in zijn geheel te voorkomen of, wanneer dit niet mogelijk is, te beperken, waarbij wordt verstaan onder:

- a) „technieken”: zowel de toegepaste technieken als de wijze waarop de installatie wordt ontworpen, gebouwd, onderhouden, geëxploiteerd en ontmanteld
- b) „beschikbare”: op zodanige schaal ontwikkeld dat de betrokken technieken, kosten en baten in aanmerking genomen, economisch en technisch haalbaar in de betrokken industriële context kunnen worden toegepast, onafhankelijk van de vraag of die technieken wel of niet binnen Nederland worden toegepast of geproduceerd, mits zij voor de exploitant op redelijke voorwaarden toegankelijk zijn, en
- c) „beste”: het meest doeltreffend voor het bereiken van een hoog algemeen niveau van bescherming van het milieu in zijn geheel

De BBT voor dampbehandeling bij vaste installaties bij raffinaderijen, chemische industrie en tankopslagbedrijven is vastgelegd in Europese BBT-conclusies en BREF-documenten. Deze technieken kunnen in beginsel ook voor het ontgassen van schepen worden ingezet. Door verschillen in procesomstandigheden en beschikbare infrastructuur kunnen deze technieken voor vaste installaties niet allemaal met dezelfde resultaat bij mobiele installaties worden ingezet.

²⁴ Niet de algemene zorgplicht van het Bal want die zorgplicht geldt alleen als er een paragraaf van hoofdstuk 3 van toepassing is.

2.2.5 Zeer zorgwekkende stoffen

De ZZS-minimalisatieplicht is onderdeel van de specifieke zorgplicht voor een milieubelastende activiteit uit artikel 2.11 van het Bal. In de toelichting op de emissiegrenswaarden (artikel 5.30) en het vermijdings- en reductieprogramma (artikel 5.24; paragraaf 5.4.3) van het Bal staat:

- Voor ZZS moet worden *gestreefd* naar een *nulemissie*
- Eerste doel is het gebruik van zeer zorgwekkende stoffen te minimaliseren, door het *gebruik te vermijden* (bronaanpak)
- Als dat niet mogelijk is, *een zo laag mogelijke emissie* voor ZZS in de lucht of het water
- De aanpak is een samenspel van bronaanpak, minimalisatie van emissies en continu verbeteren waarbij getoetst wordt of binnen grenzen van *haalbaarheid en betaalbaarheid* verdere reductie van emissies mogelijk dan wel *noodzakelijk* is

2.2.6 Algemene emissie-eisen

De emissie-eisen zoals die gesteld zijn in de wetgeving zijn als uitgangspunt genomen voor BBT. Indien er geen sprake is van dampterugwinning gelden in veel gevallen de algemene emissie-eisen volgens paragraaf 5.4.4 van het Bal. De algemene emissiegrenswaarden (artikel 5.30 van het Bal) zijn in de volgende tabel aangegeven voor:

- De productgroepen van het CDNI-verdrag
- Een aantal gehalogeneerde koolwaterstoffen
- Stikstofoxiden, die ontstaan bij verbrandingstechnieken

De fase van invoering (I, II of III) is aangegeven. Daarnaast zijn er vluchtige organische stoffen waarvoor het ontgassingsverbod van CDNI niet geldt zoals gehalogeneerde koolwaterstoffen al zijn er in ADN 2021 wel voorwaarden gesteld aan het ontgassen naar de lucht. De gangbare gehalogeneerde koolwaterstoffen zijn in gedeeld in ADN klasse 6.1 *Giftige stoffen*.

De afkorting N.E.G. staat voor '*niet elders genoemd*'. Een aantal producten zijn verkort weergegeven omwille van de leesbaarheid (aangeduid met ...). De volledige beschrijving is terug te vinden in bijlage 1. Met emissiegrens is de emissiegrenswaarde bedoeld, gedefinieerd als massa, gerelateerd aan een parameter, concentratie of niveau van een emissie die tijdens een of meer vastgestelde perioden niet wordt overschreden. De ondergrens is de massastroom op jaarbasis waaronder de emissiegrenswaarde niet van toepassing is.

Tabel 2.1 – Algemene emissie-eisen

Product	CDNI fase	Stof-klasse	Emissiegrens* [mg/Nm ³]	Ondergrens [kg/jaar]
Onderdeel van het onderzoek				
• Benzeen	I	MVP2	1	1,25
• Benzine of motorbrandstof	I	gO.2	50	250
• Aardoliedestillaten, aardolieproducten, N.E.G.	I	gO.2	50	250
• Ethanol en benzine, mengsel met meer dan 10% ethanol, ...	I	gO.2	50	250
• Ruwe aardolie (met meer dan 10% benzeen)	II	gO.2	50	250
• Ontvlambare vloeistof, N.E.G met meer dan 10% benzeen	II	gO.2	50	250
• Koolwaterstoffen, vloeibaar, N.E.G., met meer dan 10% benzeen	II	gO.2	50	250
Geen onderdeel van het onderzoek (fase III)				
Aceton, cyclohexaan, ethanol, ethyl-tert-butyl-ether (ETBE), iso-octenen**, methanol, ruwe aardolie (met minder dan 10% benzeen), ontvlambare vloeistof, N.E.G., met minder dan 10% benzeen, methyl-tert-butylether (MTBE), koolwaterstoffen, vloeibaar, N.E.G., met minder dan 10% benzeen	III	gO.2	50	250
Geen onderdeel van onderzoek / CDNI-verbod				
Gehalogeneerde koolwaterstoffen zoals				
• 1,2-dichloorbenzeen ***	n.v.t.	gO.2	50	250
• 1,1-dichloorethaan	****	gO.2	50	250
• 1,2-dichloorethaan (EDC)	****	gO.1	20	50
• methylchloride	****	MVP2	1	1,25
• Trichlooretheen (Tri)	n.v.t.	MVP2	50	250
• Tetrachloormethaan (Tetra)	n.v.t.	-	-	-
Geassocieerd met verbrandingstechnieken				
• Stikstofoxiden (als NO ₂ bij 3% zuurstofovermaat)	n.v.t.	n.v.t.	100	1.000

n.v.t.: niet van toepassing

* Verschillende van de CDNI-productgroepen kunnen benzeen en andere stoffen bevatten die ingedeeld zijn in stofklasse MVP2. Voor het aandeel MVP2 in de dampen geldt de algemene emissiegrenswaarde van 1 mg/Nm³.

** Niet vermeld in Bal bijlage iii bij artikelen 4.192, 4.207, 4.226, 4.236, 4.277, 4.654 en 5.28; verwachte indeling

*** Dampspanning bij 20° kleiner dan 5 kPa

**** Niet als dusdanig vermeld op de lijst maar komt inhoudelijk overeen met UN 1993 – Ontvlambare vloeistof, N.E.G., met minder dan 10% benzeen

Kenmerk R001-1292542RAX-V05

Een voorbeeld van koolwaterstoffen met een benzeengehalte hoger dan 10 % is 'pygas' (pyrolysis gasoline). Naftasoorten bevatten gebruikelijk minder dan 10 % benzeen.

De normstelling voor gehalogeneerde koolwaterstoffen loopt sterk uiteen zoals uit de tabel kan worden opgemaakt.

2.2.7 Op- en overslag van benzine

De op- en overslag van benzine bij overslagbedrijven moet – mits aangewezen in hoofdstuk 3 van het Bal – voldoen aan de bepalingen van paragraaf 4.105 van het Bal. De eisen betreffen onder andere:

- Dampterugwinning²⁵
- Dampverbranding indien dampterugwinning technisch niet mogelijk²⁶
- Uurgemiddelde emissiegrenswaarde lager dan 150 mg/Nm³ (maatwerk mogelijk)²⁷

Daarnaast is het ook toegestaan²⁸ om tijdelijk damp op te slaan en elders voor dampterugwinning aan te bieden. Deze optie wordt niet verder beschouwd.

Voor de volledigheid wordt opgemerkt dat benzine²⁹ in voorgaande betrekking heeft op motorvoertuigen; dus niet van toepassing op vliegtuigbenzine (avgas³⁰) of alkylaatbenzine voor gereedschap met een benzinemotor. Verder geldt deze bepaling voor een 'benzineoverslaginstallatie'.

²⁵ Met het oog op het beperken van verontreiniging van de lucht worden bij een benzineoverslaginstallatie tijdens het vullen van een mobiele benzinetank, met uitzondering van het vullen van een tankwagen langs de bovenzijde, verplaatsingsdampen via een dampdichte leiding teruggevoerd naar een benzinedampterugwinningseenheid.

²⁶ Als dampterugwinning onveilig of technisch niet mogelijk is door de hoeveelheden retourdamp, kan een benzinedampterugwinningseenheid worden vervangen door een dampverbrandingseenheid.

²⁷ Met het oog op het beperken van verontreiniging van de lucht is bij een benzineoverslaginstallatie de gemiddelde concentratie dampen in de afvoer van een benzinedampterugwinningseenheid of een dampverbrandingseenheid, gecorrigeerd voor de verdunning tijdens de behandeling, lager dan 0,15 g/Nm³ voor een uur.

²⁸ Bal, artikel 4.1081, lid 4: Als op een benzineterminal het benzinedebiet minder is dan 25.000 ton/jaar, kan directe dampterugwinning op de benzineterminal worden vervangen door voorlopige dampopslag in een benzineopslagtank met een vast dak op een benzineterminal voor latere overbrenging naar en terugwinning op een andere benzineterminal, daaronder niet begrepen de overbrenging van damp van de ene naar de andere benzineopslagtank op een benzineterminal..

²⁹ In de Europese richtlijn 94/63/EG is de definitie van benzine als volgt gegeven: *aardolie derivaat, met of zonder additieven, met een volgens de Reidmethode bepaalde dampdruk van 27,6 kPa of meer, dat voor gebruik als brandstof voor motorvoertuigen is bestemd, met uitzondering van vloeibaar petroleum gas (LPG)*

³⁰ *Aviation gasoline, benzine voor zuigermotoren van vliegtuigen; kan tetraethyllood (TEL) bevatten, geclassificeerd als ZZS; dampspanning 38-48 kPa bij 38°C*

2.2.8 Gasmotor

Omdat het hoofddoel van de dampbehandelingsinstallatie de vernietiging van een afvalstof is, wordt de activiteit als afvalverbranding gezien, los van nuttig gebruik van de energie die vrijkomt bij verbranding. Verbranding van scheepsdampen van ontgassende schepen door gasmotoren valt zo onder de milieubelastende activiteit van Bal paragraaf 3.2.15, te weten '*verbranden van afvalstoffen anders dan in een ippc-installatie*' waardoor luchtparagraaf 5.4.4 van het Bal van toepassing³¹ is met de emissiegrenswaarden die in artikel 5.30 zijn gesteld (zie tabel in paragraaf 2.2.6).

Als het hoofddoel van de gasmotor het nuttig gebruik van de mechanische kracht is, bijvoorbeeld voor de opwekking van elektriciteit, en als de damp de status van einde-afvalstof kan krijgen, is er sprake van een stookinstallatie³² waarbij voor gasmotoren met grotere vermogens de eisen van paragraaf 4.126 *Kleine en middelgrote stookinstallatie voor standaard brandstoffen* of 4.127 *Middelgrote stookinstallatie voor niet-standaard brandstoffen* van toepassing kunnen zijn. De eisen voor de stoffen die paragraaf 4.126 of 4.127 niet regelen volgen direct uit genoemde paragrafen hoofdstuk 5. Hierbij kan worden opgemerkt dat om aan de NO_x-emissie-eisen te voldoen de gasmotor zal moeten worden uitgerust met een de-NO_x installatie. Een standaard gasmotor zal bij het verwerken van damp met hoog benzeengehalte niet zonder een oxiderend katalysatorbed kunnen voldoen aan de algemene emissie-eisen voor benzeen in paragraaf 5.4.4.

Volgens de definitie van het Bal omvat het begrip gasmotor twee varianten van een verbrandingsmotor:

- Werking door vonkontsteking volgens Ottocyclus
- Werking door compressieontsteking voor zover de motor geschikt is om zowel gasolie (diesel) als damp als brandstof ('dual-fuelmotor') te gebruiken

De emissiegrenswaarden volgens paragraaf 4.126 *Kleine en middelgrote stookinstallatie voor standaard brandstoffen* van het Bal geldend voor een gasmotor met een thermisch vermogen³³ vanaf 2,5 kW_{th} zijn aangegeven in artikel 4.1307 en samengevat in de volgende tabel.

³¹ Daarnaast is ook ZZS-paragraaf 5.4.3 uit het Bal van toepassing

³² Technische eenheid waarin brandstoffen worden geoxideerd om de warmte die zo wordt opgewekt te gebruiken (Bijlage bij artikel 1.1 van het Bal)

³³ Het vermogen van een gasmotor voor dampverwerking zal gebruikelijk groter zijn dan 2,5 kW_{th}

Tabel 2.2 – Emissiegrenswaarden voor een gasmotor/dieselmotor volgens paragrafen 4.126 en 4.127

Rookgas	Referentie	NOx als NO ₂ [mg/Nm ³]	VOS*
Gasmotor minder dan 2,5 MWth, gestookt op propaan, butaan of niet-standaard brandstof	Droog, 15% O ₂ (omgerekend 3%)	115 (347)	-
Gasmotor vanaf 2,5 MWth, gestookt op propaan of butaan	Droog, 15% O ₂ (omgerekend 3%)	35 (106)	500 (1.510)
Gasmotor vanaf 2,5 MWth, gestookt op niet-standaard brandstof	Droog, 15% O ₂ (omgerekend 3%)	35 (106)	-

* Onverbrande koolwaterstoffen

Emissie-eisen voor andere stoffen kan het bevoegd gezag bij maatwerk opnemen in de vergunning, op basis van de luchtparagraaf of eventueel de paragraaf voor grote stookinstallaties. De gasmotors voor het behandelen van ontgassingsdamp zijn gelet op het vermogen geen 'grote' stookinstallatie maar de emissiegrenswaarden van artikel 4.39a van het Bal zijn wel indicatief voor het BBT-geassocieerd emissieniveau:

- Formaldehyde (gasmotor op aardgas): 15 mg/Nm³
- VOS als koolstof (gasmotor op aardgas): 500 mg/Nm³
- Ammoniak (met SCR of SNCR): 5 mg/Nm³

2.2.9 Afvalstatus

In dit document wordt niet nader ingegaan of een uitspraak gedaan over de afvalstatus van de damp of het dampcondensaat omdat afvalstatus in het geval van dampbehandeling van het ontgasen van binnenvaarttankers niet van invloed is op milieutechnisch de beste keuze van de techniek.

De afvalstatus kan wel van invloed zijn op de aanwijzing in hoofdstuk 3 van het Bal, waaronder 'handelingen met afvalstoffen'³⁴ en hiermee op de al dan niet van toepassing zijnde paragrafen van hoofdstuk 4 en 5, waaronder de luchtparagraaf 5.4.4 en de paragraaf voor ZZS 5.4.3.

2.2.10 Lokale milieuaspecten

De lokale milieuaspecten die mogelijk van belang zijn bij de inpasbaarheid van een techniek zijn kort beschouwd in de volgende tabel.

Tabel 2.3 – Milieuaspecten die mogelijk van belang zijn

Milieuaspect	Beschouwing
N-depositie	Verbranding van dampen en het opwekken van elektriciteit met brandstoffen gaat gepaard met de uitstoot van stikstofoxiden en mogelijk ammoniak wat leidt tot een toename van stikstofdepositie. De zeehavens liggen nabij duinen, Natura 2000-gebieden, waar geen toename van N-depositie kan worden toegestaan. Dit vormt een randvoorwaarde bij de techniekeuze en kan bepalend voor de juridische haalbaarheid op een gegeven locatie.

³⁴ De paragraaf over afvalverbrandingsinstallaties is niet van toepassing aangezien die niet geldt voor gasvormige afvalstoffen.

Milieuaspect	Beschouwing
Luchtkwaliteit	<p>Elke vorm van behandeling kent nog een restemissie en afhankelijk van de techniek kan samengaan met de uitstoot van andere luchtverontreinigende stoffen (zie vorige beschouwing). In veel gevallen zal het netto effect gunstig zijn voor de luchtkwaliteit maar als een beperkte afname van VOS gepaard gaat met een aanzienlijke uitstoot van stikstofoxiden kan het effect op de luchtkwaliteit en volksgezondheid schadelijk uitpakken.</p> <p>De toename van de concentratie aan stoffen waarvoor een maximaal toelaatbaar risico is gesteld in de omgevingslucht bij omwonenden zal naar verwachting in alle gevallen verwaarloosbaar zijn, ook in onmiddellijke omgeving van de grote zeehavens.</p>
Geur	<p>Het behandelen van dampen van ontgassing leidt niet alleen tot een lagere uitstoot van VOS maar ook zal ook de geur beperken. Echter, als er ergens lokaal sprake is van een hoge geurbelasting voor bewoners kan een aanvullende geurbron mogelijk niet aanvaardbaar zijn. Zo kampen veel gebieden grenzend aan de havens van Amsterdam en Rotterdam met geuroverlast.</p>
Geluid	<p>Elke vorm van dampbehandeling gaat gepaard met geluid, zowel van de installatie als van het schip en daarnaast indien van toepassing de elektriciteitsgenerator. Als er ergens lokaal sprake is van een hoge geluidsbelasting kan een aanvullende geurbron mogelijk niet aanvaardbaar zijn. Zo kampen veel gebieden grenzend aan de havens van Amsterdam en Rotterdam met geluidsoverlast.</p>
Afvalwater	<p>Gaswassing is een absorptietechniek waarbij VOS van lucht wordt geconcentreerd in een vloeistof. Met water als wasmedium zal leiden tot afvalwater dat vervolgens moet worden behandeld. Een dampbehandelingsinstallatie beschikt in beginsel niet over een eigen afvalwaterzuivering. Verzadigd spuiwater, afvalwater, zal dan moeten worden verzameld en afgevoerd naar een afvalwaterzuiveringsinstallatie.</p>
Bodemrisico	<p>Voor zover vloeistoffen in het proces voorkomen, kunnen die lekken uit bijvoorbeeld de aan-/afvoerleidingen, gaswasser en opslag van condensaat, wat een risico voor bodemverontreiniging vormt. Dit risico kan worden beheerst met passende bodembeschermende maatregelen bij de betreffende steiger.</p>
Afval	<p>Adsorptie met bijvoorbeeld actiefkool is een techniek waarbij VOS in lucht wordt geconcentreerd aan een vaste stof. Dit zal leiden tot gevaarlijk afval dat vervolgens moet worden behandeld. In de eenvoudigste vorm beschikt de installatie niet over de mogelijkheid om het actiefkool te reactiveren. Het verzadigde kool moet dan worden vervangen en afgevoerd naar een reactiveringsinrichting.</p>
Externe veiligheid	<p>De te behandelen dampen zijn in de meeste gevallen explosiegevaarlijk.</p>

2.3 BBT-conclusies

De BBT-conclusies afgasbehandeling in de chemische industrie [EU 2022/2427] zijn niet van toepassing op dampbehandeling van het ontgassen van binnenvaarttankers maar geven wel richting aan BBT-overwegingen. Zo is in BBT 9 en BBT 10 de voorkeursbehandelingsmethode aangegeven, te weten:

1. Terugwinnen van productdamp
2. Nuttig gebruiken van de energetische waarde van de productdamp
3. Behandeling zonder terugwinning of nuttig gebruik van de energetische waarde

Voor aardolieraffinaderijen moet volgens BBT 52 van het uitvoeringsbesluit van 9 oktober 2014 tot vaststelling van de BBT-conclusies voor het raffineren van aardolie en gas tenminste 95% van de emissies van laden en lossen van VOS worden teruggewonnen. De BBT-geassocieerde emissieniveaus zijn 150 – 10.000 mg/Nm³. In Nederland wordt de ondergrens van 150 mg/Nm³ als het BBT-geassocieerd emissieniveau gezien (Bal, paragraaf 4.105).

2.4 Circulaire economie

Het beleid voor het beheer van afvalstoffen in Nederland is opgenomen in het landelijk afvalbeheerplan (LAP3), zoals verplicht onder de Wet milieubeheer en de Europese Kaderrichtlijn afvalstoffen. De kaderrichtlijn (Kra) geeft aan dat bij het opstellen van wetgeving en beleidsinitiatieven voor preventie en beheer van afvalstoffen de afvalhiërarchie moet worden gehanteerd zoals aangegeven in artikel 4 van de Kaderrichtlijn. Deze hiërarchie is overgenomen in artikel 10.4 van de Wet milieubeheer (Wm). In LAP3 is de afvalhiërarchie als volgt:

- a. Preventie;
- b. Voorbereiding voor hergebruik;
- c1. Recycling van het oorspronkelijke materiaal in een gelijke of wat betreft de vereiste kwaliteit van het materiaal vergelijkbare toepassing, waaronder ook mechanische recycling en chemische recycling in de vorm van 'monomeer chemische recycling' en 'solvolyse' maar niet als 'chemische recycling via basischemicaliën' (*);
- c2. Recycling van het oorspronkelijke materiaal in een niet gelijke of wat betreft de vereiste kwaliteit van het materiaal niet vergelijkbare toepassing en/of chemische recycling via basischemicaliën;
- d. Andere nuttige toepassing, waaronder energierterugwinning;
- e1. Verbranden als vorm van verwijdering;
- e2. Storten of lozen.

In sectorplan 59 *Vloeibare brandstof- en olierestanten* van het plan is vastgelegd wat de minimumstandaard is voor brandstofrestanten. Die is nuttige toepassing, bijvoorbeeld hoofdgebruik als brandstof. Dit is op de afvalhiërarchie een trede hoger dan verwijdering door verbranding (zonder energierterugwinning).

Het nationaal programma circulaire economie 2023-2030 geeft aan dat de Nederlandse ambitie is om in 2050 een fossielvrije economie te hebben. Terugwinnen van de brandstoffen uit

Kenmerk R001-1292542RAX-V05

binnenvaartschepen heeft daarom op milieutechnische gronden en vanuit beleidsoverwegingen de voorkeur boven vernietiging van de damp.

3 Uitgangspunten

3.1 Toelichting

Dit hoofdstuk 3 gaat in op de procescondities van de te verwerken damp. Daarbij zijn kenmerkende condities aangegeven van producten die model staan voor de te beschouwen productgroepen. Er is bewust gekozen voor kenmerkende conditie om een representatief beeld van de werkelijke situatie te schetsen en niet voor extremen ('worst case'). De techniekeuze blijft overigens in beide gevallen dezelfde.

De emissie-eisen zoals die gesteld zijn in de wetgeving zijn als uitgangspunt genomen voor BBT. Deze zijn in het vorige hoofdstuk aangegeven en hier kort vereenvoudigd samengevat.

Ten aanzien van het ontgassen geldt dat de concentratie van de dampen in de ladingtank moet worden teruggebracht tot ten hoogste 10% van de onderste explosiegrens (LEL) om naar de buitenlucht te mogen ventileren. Stoffen met een dampspanning van minder dan 5 kPa bij 20 °C vallen buiten het verbod op vrij ontgassen.

De eisen die voor dampverwerking bestaan uit:

- Emissiegrenswaarde voor de concentratie ladingdamp na behandeling
- Terugwinning van productdamp
- Emissiegrenswaarden voor rookgassen

Tevens is de vergelijking gemaakt tussen dampbehandeling in mobiele en vaste installaties.

3.2 Procescondities

Om de technieken te kunnen beschouwen moeten eerst de uitgangspunten van het dampaanbod helder zijn. De procescondities bij het ontgassen van binnenvaarttankers worden vooral bepaald door het volumedebiet, bedrijfstijd, dampconcentratie aan het begin en het eind van ontgassen.

3.2.1 Praktijkonderzoek ontgassen van binnenvaarttankers

De kenmerkende procesomstandigheden kunnen worden afgeleid van een meetonderzoek [Antea 2013] uit 2013 naar de praktijk van het ontgassen van binnenvaarttankers zonder dampbehandeling (zie bijlage voor een samenvatting van de resultaten en analyse). De belangrijkste conclusies van dat meetonderzoek voor onderhavig rapport zijn:

- Een ventilatiedebiet van 600 Nm³/uur, ontgassingstijd van 7 uur en ventilatievoud³⁵ van 2,4 zijn de kenmerkende waarden³⁶, waarbij het werkelijke ventilatiedebiet een factor zeven lager is dan het opgegeven vrije debiet van de ventilatoren

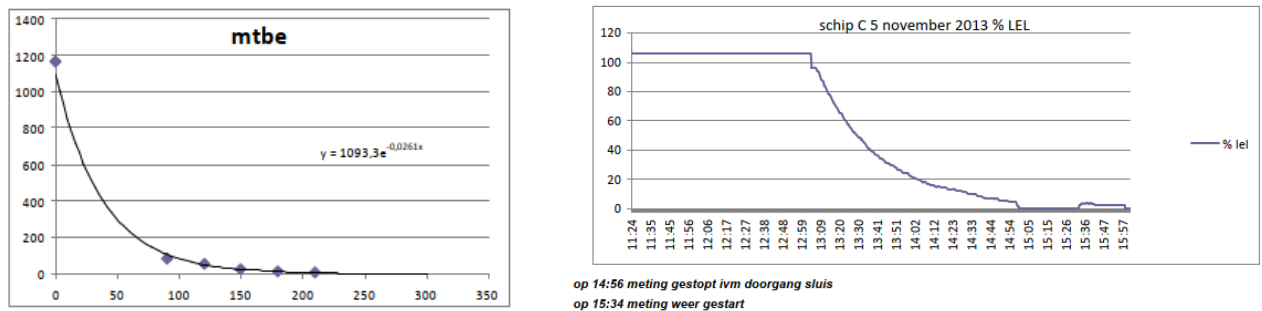
³⁵ Ventilatievoud geeft aan hoeveel keer het volume van de tank is geventileerd, bijvoorbeeld een ventilatievoud van 2 geeft dan het geventileerd volume twee keer het tankvolume bedraagt.

³⁶ Met als bandbreedte respectievelijk 110 – 820 Nm³/uur, 5 – 8 uur, 0,9 – 3,7 ventilatievoud

- De damp bij aanvang van de ontgassing is in de meeste gevallen verzadigd³⁷
- De concentratie³⁸ aan het eind van het ontgassen bedraagt ordegrrootte 1.000 mg/m³, wat ordegrrootte overeenkomt met de vereiste AVFL-concentratie al zijn er uitzonderingen
- Als er minder dan één keer het tankvolume wordt geventileerd (ventilatievoud < 1) voldoet de eindconcentratie niet aan de vereiste AVFL-concentratie zoals vastgesteld bij een voorlading met MTBE en met toluen

3.2.2 Relatie tussen concentratie en ventilatievoud

Tijdens het ontgassen neemt de concentratie exponentieel af waarbij de concentratieafname volgens de VOS-meting aan het begin een ander verloop laat zien dan dat gemeten met een explosiemeter. Dit is geïllustreerd in de volgende figuur (overgenomen uit [Antea 2013]).



* overgenomen van [Antea 2013]; de eenheden in de linker figuur zijn mg/Nm³ voor X-as en minuten voor de Y-as
 Figuur 3.1 – Vergelijking tussen het concentratie verloop gemeten met VOS-meting en met explosiemeter

Het is onduidelijk of het aanvankelijk vlakke concentratieverloop volgens de explosiemeter verband houdt met de meetpositie in de producttank of dat het restant vloeistof aan de wanden en op de vloer eerst verdampt waarna pas de concentratie afneemt.

De exponentiële afname betekent dat het ventilatievoud (~ ontgassingstijd) sterk toeneemt met een lagere eindconcentratie. De studie uit 2013 geeft de exponentiële functie voor de relatie tussen de ontgassingstijd en de concentratie voor een viertal stoffen, waaronder *aardoliedestillaat met een benzeengehalte groter dan 10%* en *ethanol*. De algemene vergelijking is als volgt:

$$[Concentratie\ na\ tijdsverloop\ x] = [Beginconcentratie] \cdot e^{(constante \cdot [ontgassingstijd\ x])}$$

³⁷ De verzadigingsdampdruk is de druk uitgeoefend door damp in thermodynamisch evenwicht met de vloeistof bij de heersende temperatuur. Deze damp onder verzadigingsdampdruk noemt men verzadigde damp. Een damp onder een lagere druk dan de verzadigingsdampdruk noemt men onverzadigde damp. De verzadigingsgraad is de relatieve verhouding van de druk uitgeoefend door damp tot de verzadigingsdampdruk van die damp bij de heersende temperatuur, 100% voor verzadigde damp en minder dan 100% voor onverzadigde damp

³⁸ 1.000 mg damp per m³ lucht met dampspanning van 5 kPa bij 20°C en molmassa van 100 g/mol:
 $V_{damp} = massa \cdot R \cdot T / (P \cdot M) \sim 0,001\ kg \cdot 8,314\ J/mol \cdot K \cdot 288\ K / (5\ kPa \cdot 100\ g/mol) = 0,005\ m^3\ damp\ per\ m^3\ lucht \sim 0,5\% \ v/v$ wat circa 0,1% van de drempelwaarde van 5 kPa is als maat voor 10%LEL.

Deze vergelijking kunnen worden uitgedrukt voor het ventilatievoud door de ontgassingstijd te vervangen door het ontgaste volume te delen door het tankvolume. De algemene vergelijking kan als volgt worden geschreven:

$$[\text{Ventilatievoud}] = \text{constante} \cdot \log_{10} \left(\frac{[\text{Concentratie}]}{[\text{Beginconcentratie}]} \right)$$

De constanten zijn:

- Aardoliedestillaat > 10 %benzeen: -0,8703
- Ethanol: -1,025

Hieruit volgt dat de concentratie gemiddeld met een factor 10 afneemt met een ventilatievoud³⁹ van ca. 1 wat overeenkomt met ca. 3 uur ventileren (debiet van 600 m³/uur en opslagtank van 2.000 m³):

- Afname van 100% → 10%: ventilatievoud 0,95 – 3 uur
- Afname van 10% → 1%: ventilatievoud 1,9 – 6 uur
- Afname van 1% → 0,1%: ventilatievoud 2,8 – 9 uur

Waarbij kan worden opgemerkt dat vluchtigere producten zoals MTBE en lichte aardolieproducten sneller verdampen dan de minder vluchtige zoals methanol en ethanol.

De vergelijking voor *aardoliedestillaat met een benzeengehalte groter dan 10%* is gehanteerd voor het modeleren van het verloop van de ontgassing van aardolieproducten (benzine, nafta, pygas, benzeen), de vergelijking voor ethanol is gebruikt voor ethanol en voor overige producten.

3.2.3 Dampverzading

Een uitgebreid onderzoek naar de damp bij het beladen van binnenvaarttankers [API 2014, tabel 4), geeft aan de verzadigingsgraad voor benzine 30% bedraagt, 50% voor andere vluchtige producten (dampspanning > 10 kPa) en 30% voor minder vluchtige producten (dampspanning ≤ 10 kPa). Uit gesprekken met vertegenwoordigers van verschillende belanghebbenden ontstaat het beeld dat (nagenoeg) volledig verzadigde damp het vaakst voorkomt. Het verschil in verzadiging van de damp tussen de API referentie en het Nederlandse onderzoek van 2013 kan wellicht worden verklaard door:

- Standtijd: de verdampingssnelheid is mede afhankelijk van de 'wind' in de producttank, de mate waarin de damp aan het vloeistofoppervlak wordt verdund; als de damp niet door drukverschillen ('wind') wordt verplaatst verloopt de verdamping alleen als gevolg van diffusie (Brownse beweging), wat een langzaam proces is. Daarbij speelt mee dat de damp zwaarder is dan lucht wat menging van lucht met damp door drukverschillen (bijvoorbeeld als gevolg van temperatuurverschillen) tegengaat; tijdens het lossen van de vorige lading kan verse lucht zijn ingezogen en de standtijd van de gesloten producttanks kan te kort zijn om volledige verzadiging te bereiken middels diffusie

³⁹ Gemiddelde van 0,87 en 1,03, vergelijkbaar met de theoretische waarde van 0,9 die nodig is om van 100% naar 10% verzadiging gemiddeld in de producttank te zakken. Dit kan een gevolg zijn van de uitgangconcentratie niet 100% was maar lager of dat het model de afname in het begin overschat.

Kenmerk R001-1292542RAX-V05

- Bemonstering in het producttank: het is niet eenvoudig om de gemiddelde concentratie in een producttank goed vast te stellen gelet op de hiervoor genoemde stratificatie van zware productdamp onderin de tank; de beschikbare metingen van concentraties in de producttank geven niet noodzakelijk een sluitend beeld en kunnen leiden tot verkeerde conclusies ten aanzien van de gemiddelde verzadigingsgraad

3.3 Gemodelleerde procesomstandigheden

Met voorgaande conclusies in gedachte en de afbakening voor dit rapport zijn een viertal situaties beschouwd voor de verdere analyse. Het doel is representatieve, onderling vergelijkbare ontgasingsituaties te bepalen.

Modelstoffen

Om de praktijk van een honderden verschillende producten hanteerbaar te maken voor dit onderzoek zijn een aantal 'modelstoffen' gekozen waarmee de effecten van de technieken en de technieken onderling kunnen worden vergeleken. De modelstoffen zijn in de volgende tabel beschouwd.

Tabel 3.1 – Beschouwde modelstoffen

Tabel	UN-Nr.	Goederennaam	Beschouwing
I	UN 1114	Benzeen	Volgens industrie-afspraken wordt benzeen alleen in 'dedicated' vaart vervoerd, waardoor ontgassen voor wisseling van onverenigbare producten in de praktijk niet voorkomt
I	UN 1203	Benzine of motorbrandstof	Benzine is beschouwd als modelstof met als kenmerkende waarde voor de dampspanning 60 kPa DVPE ⁴⁰ (VOTOB 2023).
I	UN 1268	Aardoliedestillaten, aardolieproducten, N.E.G.	De producten in deze groep betreffen nafta-achtige producten afkomstig van raffinaderijen, petrochemische industrie en koolteerdestillatie, waarvan is aangenomen dat de technieken die geschikt zijn voor benzine ook geschikt zullen zijn voor de producten van deze groep
I	UN 3475	Ethanol en benzine, mengsel van ethanol en motorbrandstof, mengsel met meer dan 10% ethanol	Ethanol is beschouwd als modelstof omdat er geen bovengrens aan het gehalte aan ethanol in het mengsel is aangegeven en benzine op zich al als modelstof dient
II	UN 1267	Ruwe aardolie (met meer dan 10% benzeen)	Voor zover ruwe aardolie in binnenvaarttankers wordt geladen gebeurt dit in 'dedicated' vaart waardoor ontgassen voor wisseling van onverenigbare producten in de praktijk niet voorkomt in Nederland
II	UN 1993	Ontvlambare vloeistof, N.E.G met meer dan 10% benzeen	De producten in deze groep betreffen aardolieproducten afkomstig van raffinaderijen en petrochemische

⁴⁰ De dampspanning van de vloeistof bij 37,8°C bepaald volgens EN 13016-1. Deze methode geeft de gelijkwaardige droge dampdruk, 'calculated dry vapour pressure equivalent' (DVPE) en is vergelijkbaar met de 'Reid Vapour Pressure' (RVP) maar dan op waterniveau basis.

Tabel	UN-Nr.	Goederennaam	Beschouwing
			industrie. Benzeen is beschouwd als modelstof omdat er geen bovengrens aan het gehalte aan benzeen in het mengsel is aangegeven en omdat mag worden aangenomen dat als de techniek voldoet aan de emissie-eisen voor benzeen, een ZZS, de techniek ook geschikt zal zijn voor de overige verbindingen in het product.
II	UN 3295	Koolwaterstoffen, vloeibaar, N.E.G., met meer dan 10% benzeen	Zie beschouwing voor UN 1993

N.E.G.: niet elders genoemd

** Niet als dusdanig vermeld op de lijst maar komt inhoudelijk overeen met UN 1993 – Ontvlambare vloeistof, N.E.G., met minder dan 10% benzeen*

Voorgaande beschouwing leidt tot selectie de volgende modelstoffen waarmee de BBT-keuze inzichtelijk kan worden gemaakt:

- Benzine
- Benzeen
- Ethanol

Ventilatievoud

Het benodigde ventilatievoud is eerst berekend volgens de functies van de vorige paragraaf voor de AVFL-concentratie. In de praktijk wordt meestal tot onder deze concentratie ontgast. De volgende tabel geeft de procescondities voor deze situaties aan.

Tabel 3.2 – Beschouwde procesomstandigheden van ontgassing

Procesconditie	Eenheid	Benzine*	Benzeen	Ethanol
MVP2-gehalte	% m/m	0,7%	100%	0%
Dampspanning (15°C)	kPa	30	7,9	4,3
Verzadigde damp (15°C)	% v/v	30%	7,7%	4,3%
	g/Nm ³	885	270	88
Verzadingsgraad	%	100%	100%	100%
Onderste explosiegrens (LEL)	% v/v	1,4%	1,2%	3,1%
Ventilatievoud tot LEL	m ³ /m ³	1,6	1,7	1,5
Eindconcentratie = AVFL	% v/v	0,14%	0,12%	0,31%
	g/Nm ³	4,1	4,2	6,4
Ventilatievoud tot AVFL	m ³ /m ³	2,5	2,5	2,6
Totale inhoud van de producttanks	m ³	5.000	3.500	3.500
Debiet door alleen zuigen	m ³ /uur	500	500	500
~ ontgassingstijd	uur	25	18	18
Debiet door zuigen en blazen	m ³ /uur	800	800	800
~ ontgassingstijd	uur	16	11	11

* Kenmerkende waarde voor de dampspanning is 60 kPa als DVPE met 52 kPa en 83 kPa als P10- en P90-waarde

Uit gesprekken met dampverwerkers komt naar voren dat het gebruikelijk is om bij aanvang uit te gaan van een ventilatievoud van 5. Het benodigde ventilatievoud is onder andere afhankelijk de vluchtigheid van het product, de restanten productvloeistof, de uitvoering van de producttank (zoals wandcoating, nalensysteem) en staat van de producttank.

3.4 Onderscheid tussen vaste en mobiele dampbehandeling

In beginsel zijn de omstandigheden voor het ontgassen bij een mobiele installatie vergelijkbaar met die bij een vaste dampverwerkingsinstallatie (DVI) van een tankterminal tijdens het laden van een lichter. Er zijn echter een aantal verschillen. De kenmerkende procesomstandigheden kunnen worden afgeleid van een meetonderzoek [Taskforce 2021] uit 2021 naar de praktijk van het ontgassen van binnenvaarttankers met dampbehandeling (zie bijlage voor een samenvatting van de resultaten en analyse). De volgende tabel vergelijkt beide situaties.

Tabel 3.3 – Procesomstandigheden van ontgassing vergeleken met dampverwerking bij tankterminals

Procesconditie	Eenheid	Tankterminal	Mobiele dampverwerking
Drijvende kracht voor verplaatsing	-	Productpomp: - verdringen en zuigen	Ventilator: - alleen zuigen of - zuigen en blazen
Maximum dampdebiet tijdens laden van 1 lichter	Nm ³ /uur	1.500	- alleen zuigen: 150 – 500 - zuigen en blazen: tot 1.000
Dampdebiet bij gelijktijdig laden of ademen van opslagtanks	Nm ³ /uur	3.000 – 6.000	Niet van toepassing
Tijdsduur per lichter	uur	1,5 – 6	3,5 – 66

Procesconditie	Eenheid	Tankterminal	Mobiele dampverwerking
Restant aan vloeistof (met nalen)*	liter	Niet van belang bij 'dedicated' vaart	Vloeistofrest moet worden uitgepompt en is van invloed: - enkelwandig: 120 - dubbelwandig: 50
Opstarttijd	-	DVI kan (semi) continu worden bedreven	DVI moet bij elke ontgassing opnieuw worden opgestart; sommige technieken vergen een lange opstarttijd voordat deze de damp effectief kunnen behandelen
Beschikbaarheid*	-	De beschikbaarheid van de steiger voor ontgassen wordt beïnvloed door te laden van schepen.	De kade is alleen voor ontgassen bestemd waardoor mobiele dampverwerking makkelijker in te plannen is.
Ruimtebeslag	-	Een aantal dampverwerkings-technieken vereisen ruimte die beschikbaar is bij een tankterminal, zoals adsorptie met dampterugwinning middels absorptie, nageschakelde RTO, nageschakelde gaswassing om zure gassen te verwijderen. Bij tankopslagbedrijven is het gebruikelijk om een gasbuffer ⁴¹ (60-1.000 m ³) voor de gasmotor te plaatsen.	Bij mobiele dampverwerking is de ruimte beperkt tot compact installaties.

* In het kader van BBT zijn de aspecten tijdsduur, vloeistofrestanten, opstarttijd en beschikbaarheid niet relevant

Drijvende kracht en debiet

Het maximum debiet is een belangrijke factor in de totale behandelingstijd. Met een hoger debiet kan de behandelingstijd omgekeerd evenredig worden verkort; een twee keer hoger debiet betekent een halvering van de behandelingstijd. Daarbij wordt het debiet beperkt door het toelaatbare drukverschil in de scheeptanks. Een te grote onderdruk leidt tot implosie, een te grote overdruk tot explosie van de producttank als uiterste consequentie.

Bij een tankterminal zal de damp in de tankruimte op twee manieren worden uitgedreven:

- Verdringing als gevolg van de ingepompte vloeistof
- Zuigende werking door het dampretoursysteem (dalend vloeistofniveau in de opslagtank aan de wal) of door het ventilatiesysteem van de dampbehandelingsinstallatie

⁴¹ Leveranciers geven aan dat door verbeterd motorregeling een gasbuffer niet meer vereist is.

Deze dubbele 'aandrijving' voorkomt een grote over- dan wel onderdruk in de scheepstank zodat het drukverschil geen beperkende factor vormt voor het debiet. In de praktijk is een debiet tot 1.500 m³/uur gebruikelijk.

Bij de verbrandingstechnieken voor ontgassen is er geen dampretour zodat de aanzuiging alleen door de DVI wordt verzorgd. Dit leidt tot een aanzienlijke onderdruk in de scheepstanks, wat een beperkende factor voor het debiet is. In de praktijk is een debiet van 150 – 500 m³/uur haalbaar. Een debiet van 1.000 m³/uur leidde tot onaanvaardbare onderdruk in de zin dat veiligheidsinrichtingen in werking treden.

Bij condensatie als dampbehandelingstechniek neemt het volume na behandeling niet toe en kan de gereinigde damp weer naar de scheepstank worden geleid. Dit zou in beginsel ook mogelijk zijn met adsorptie als techniek maar is niet zo toegepast.

Dampdebiet bij gelijktijdig laden

Dampbehandelingsinstallaties van tankopslagbedrijven kunnen gebruikelijk de damp van meerdere schepen tegelijk verwerken. Dit zal in de praktijk van een mobiele DVI voor ontgassen ongebruikelijk zijn, bijvoorbeeld door de beperking van het aantal ligplaatsen. Daarnaast is het technisch aanzienlijk ingewikkelder om de gelijktijdige afzuiging van meerdere schepen goed aan te sturen.

Vloeistofrest

Vereenvoudigd gesteld zal het ontgassen in twee stappen verlopen om de vereiste concentratie (10% LEL) mogelijk te maken:

- Verdampen van de restvloeistof
- Verdunnen van de damp nadat alle vloeistof is verdampt

De hoeveelheid restvloeistof is een bepalende factor voor de behandelingstijd. In de praktijk is echter de exacte hoeveelheid restvloeistof niet bekend.

Bij een tankopslagbedrijf is, als hetzelfde product wordt geladen, de resterende vloeistof in de scheepstank niet van belang voor de DVI. De restvloeistof hoeft niet eerst te worden verdampt wat de behandelingstijd aanzienlijk bekort.

Procesmatige verschillen tussen vaste en mobiele dampverwerkingsinstallaties

De techniek van dampverwerking bij tankopslagbedrijven en raffinaderijen bestaat uit primair uit een dampterugwinningsinstallatie, die in een aantal gevallen nog een tweede stap kent in de vorm van een RTO. De gebruikelijke uitvoering van dampterugwinning is daarbij gebaseerd op adsorptie op actiefkool gecombineerd regeneratie en absorptie. De dampterugwinningsinstallatie kan voldoen aan de wettelijke emissiegrenswaarden waarbij relatief onevenredig veel energie nodig is in het lage bereik van de dampconcentratie. De combinatie met een RTO heeft als voordeel dat de dampterugwinningsinstallatie energetisch gunstiger kan worden ingesteld en de lage dampconcentraties door de RTO kunnen worden gegarandeerd.

Kenmerk R001-1292542RAX-V05

Het ruimtebeslag van een dergelijke opstelling is te groot voor mobiele toepassing. Daarnaast heeft een RTO een aanzienlijke opwarm- en afkoeltijd nodig voordat en nadat die in gebruik kan worden genomen wat ongunstig is bij mobiele toepassing.

4 Technieken

4.1 Toelichting

Dit hoofdstuk 4 beschouwt de technieken, waarbij eerst alle technieken voor het behandelen van VOS zijn gepresenteerd om vervolgens de geschikte technieken te kiezen voor nadere beoordeling in het volgende hoofdstuk. Deze studie is gericht het behandelen van dampen van ontgassing maar er wordt ook stilgestaan bij het beperken van het ontstaan van de damp.

Alle gangbare technieken voor het behandelen van VOS-dampen zijn in eerste instantie kwalitatief worden beschouwd voor toepasbaarheid bij het ontgassen. Deze informatie is bekend uit algemene referentiedocumenten zoals de Factsheets emissiebeperkende technieken [TAUW 2022], zoals beschikbaar gesteld op [website van IPLO](#) en BBT-conclusies [EU 2022/2427; 2014/738/EU].

De algemene strategie voor het terugdringen van emissies vanuit milieuperspectief⁴², in afnemende voorkeur, is kort weergegeven in de volgende tabel.

Tabel 4.1 – Strategie om VOS-emissies naar de lucht te beperken

Aanpak	Beschouwing
1. Vermijden	'Dedicated vaart' maar niet van toepassing voor dit onderzoek
2. Beperken	Verdampingsremmend middel
3. Behandelen	Onderwerp van deze studie
3.1. Productterugwinning	Mogelijk door dampterugwinning (VRU)
3.2. Nuttig gebruik van de energie	Mogelijk door bijvoorbeeld gasmotor die elektriciteit levert
3.3. Weinig neveneffecten	Neveneffecten zijn beschouwd

4.2 Algemene technieken voor het behandelen van VOS

De technieken die algemeen geschikt zijn voor het behandelen van VOS zijn genoemd in BBT-conclusie 11 van [EU2022/2427] en in de volgende tabel kort beschouwd. Thermische oxidatie is BBT maar verbranding in een gasmotor is niet als BBT genoemd. Aangezien een gasmotor wel wordt toegepast voor dampbehandeling is dit ook beschouwd. Volledigheidshalve kan aanvullend membraanfiltratie worden genoemd maar in de praktijk wordt dit niet toegepast voor mobiele dampverwerking.

De volgende kenmerken van het afgas zijn kwalitatief vergeleken:

- Ingangconcentratie: met 'laag' is aangegeven dat de techniek geschikt is voor het behandelen van een afgas met een concentratie van de te verwijderen stof die een factor 2 hoger is dan de algemene emissiegrenswaarde; met 'hoog' een concentratie die aanzienlijk hoger is
- Wisselende belasting: met 'laag' is aangegeven dat de techniek niet of minder geschikt voor het behandelen van afgassen die gekenmerkt worden door snelle wisselingen in debiet en

⁴² Zie bijvoorbeeld BBT 9 en BBT10 van BBT-conclusies afgasbehandeling [EU 2022/2427].

concentraties; met 'hoog' kan de techniek beter met snelle wisselingen omgaan zonder noemenswaardig in te boeten aan rendement en effectiviteit

Tabel 4.2 – Eerste beschouwing van technieken voor het behandelen van VOS

Werkings-principe	Techniek	Ingangs-concentratie	Wisselende belasting	Beschouwing voor ontgassing
Absorptie	Gaswasser	Hoog en Laag	Hoog	Geschikt voor wateroplosbare producten; geschikt voor olie-oplosbare producten als voorbehandeling en om damp terug te winnen; praktisch probleem van ruimtebeslag voor mobiele toepassing
Adsorptie	Adsorptiekolom met/zonder regeneratie	Hoog en Laag	Hoog	Toegepast voor het terugwinnen van benzinedampen bij tankopslagbedrijven in combinatie met een gaswasser; toegepast om lage restconcentratie te garanderen
Biologische reiniging	Biofilter	Hoog	Laag	Ongeschikt voor ontgassing; niet verder beschouwd
Condensatie	Condensor	Hoog	Hoog	Niet effectief; niet verder beschouwd
	Cryo-condensor	Hoog	Hoog	Geschikt voor hoge concentraties; toegepast in tankopslag voor chemicaliën
Membraan-scheiding	Membraanfilter	Hoog	Hoog	Toegepast voor het terugwinnen van benzinedampen bij kleinere tankopslagbedrijven in combinatie met een gaswasser maar eindconcentratie ⁴³ voldoet niet aan emissiegrenswaarde waardoor nog een aanvullende techniek vereist is
Thermische oxidatie	Eenvoudige naverbrander (VCU); Met katalysator (KO)	Hoog en Laag	Hoog	Geschikt voor hoge concentraties; ook voor lage concentraties mits steunbrandstof; toegepast in tankopslag
	Naverbrander zonder vlam (FTO)	Hoog en Laag	Hoog	Geschikt voor hoge concentraties; ook voor lage concentraties mits steunbrandstof; niet toegepast in tankopslag
	Gasmotor	Hoog en laag	Laag	Geschikt voor hoge concentraties; ook voor lage concentraties mits steunbrandstof; toegepast in tankopslag

⁴³ Ter indicatie ordegrrootte 800 g/Nm³

Werkings-principe	Techniek	Ingangs-concentratie	Wisselende belasting	Beschouwing voor ontgassing
	Regeneratieve naverbrander (RTO)	Hoog en laag	Laag	Geschikt voor hoge en lage concentraties; lage concentraties mits steunbrandstof; toegepast in tankopslag

4.2.1 Vaste dampverwerking

Voor aardolieraffinaderijen moet tenminste 95% van de emissies van laden en lossen van VOS worden teruggewonnen volgens BBT 52 van het Uitvoeringsbesluit 2014/738/EU. De aangehaalde technieken voor dampterugwinning zijn condensatie, absorptie, adsorptie, membraanscheiding en hybride systemen. In Nederland wordt de ondergrens van 150 mg/Nm³ als het BBT-geassocieerd emissieniveau gezien (Bal). Deze lage concentratie is niet haalbaar met membraanscheiding. Voor tankopslagbedrijven geldt eveneens een verplichting tot dampterugwinning (Bal, paragraaf 4.105) met 150 mg/Nm³ als emissiegrenswaarde voor benzinedamp.

De techniek van dampverwerking bij tankopslagbedrijven en raffinaderijen bestaat uit primair uit een dampterugwinningsinstallatie, die in een aantal gevallen nog een tweede stap kent in de vorm van een RTO. De gebruikelijke uitvoering van dampterugwinning is daarbij gebaseerd op adsorptie op actiefkool gecombineerd regeneratie en absorptie. De dampterugwinningsinstallatie kan voldoen aan de wettelijke emissiegrenswaarden waarbij relatief onevenredig veel energie nodig is in het lage bereik van de dampconcentratie. De combinatie met een RTO heeft als voordeel dat de dampterugwinningsinstallatie energetisch gunstiger kan worden ingesteld en de lage dampconcentraties door de RTO kunnen worden gegarandeerd.

Deze technieken zijn ook geschikt om ingezet te worden voor het ontgassen van schepen, waarbij dezelfde emissiegrenswaarden kunnen worden bereikt. Uit beschikbare meetrapporten van reeds geïnstalleerde installaties is gebleken dat installaties aan de toepasselijke emissie-eisen kunnen voldoen.

4.2.2 Mobiele dampverwerking

Een belangrijke voorwaarde voor toepassing is met name dat er voldoende kadeoppervlak beschikbaar is of wordt gemaakt.

Gebaseerd op voorgaande beschouwing zijn de volgende technieken, al dan niet in combinatie, geschikt voor mobiele dampverwerking:

- Geschikt voor hoge concentratie (verzadigde damp)
 - Cryocondensor
 - Eenvoudige naverbrander (VCU)
 - Naverbrander zonder vlam (FTO)
 - Gasmotor
- Geschikt voor lage concentratie (emissiegrenswaarde)
 - Adsorptiekolom zonder regeneratie

- Eenvoudige naverbrander (VCU) met steunbrandstof
- Naverbrander zonder vlam (FTO) met steunbrandstof
- Gasmotor met steunbrandstof
- Regeneratieve naverbrander (RTO) en katalytische oxidatie (KO)

4.3 Producteigenschappen in relatie tot dampverwerking

Na een overzicht van de producteigenschappen in de volgende tabel volgt een bondige⁴⁴ bespreking van de technieken gericht op het ontgassen. De eigenschappen van de producten die van belang zijn voor dampbehandeling zijn in deze paragraaf per productgroep in beeld gebracht, bijvoorbeeld explosiegevaar, condensatietemperatuur en oplosbaarheid in water dan wel olie.

Tabel 4.3 – Beschouwde producten en kenmerken voor dampterugwinning

Fase	Product	Explosie-beveiliging	Balans-leiding	Absorptie	Adsorptie met TW	Therm. oxidatie	LEL [% v/v]	TW_99% [°C]
1	Benzeen	Ja, K1	V	KWS	A	+	1,2	-48
	Benzine	Ja, K1	O	KWS	A	+	0,6	-90
2	Pygas	Ja, K1	O*	KWS	A	+	0,6–1,2	-90 – -48
3	Ethanol	Ja, K1	O	Water	B	+	3,5	-40
	1,2-dichloorbenzeen	Nee, K3	O	-	A	-	2,2	ca. -35
	1,2-dichloorethaan (EDC)	Ja, K1	O	-	A	-	6,2	-47
	Trichlooretheen (Tri)	Nee	O	-	A	-	7,9	-50
	Tetrachloormethaan (Tetra)	Nee	O	-	A	-	n.v.t.	-51
	Chloroform	Nee	O	-	A	-	n.v.t.	-52

n.v.t.: niet van toepassing

** In de praktijk blijft het benzeengehalte van pygas niet leidt tot stolling in de leiding*

De verklaring van de kolommen is als volgt:

- Explosiebeveiliging: aangegeven is of een explosiebeveiliging vereist is en de productklasse⁴⁵:
 - K0: Vloeistoffen met een vlampunt lager dan 0°C en een beginkookpunt lager of gelijk aan 35°C
 - K1: Vloeistoffen met een vlampunt lager dan 23°C en een beginkookpunt hoger dan 35°C
 - K2: Vloeistoffen met een vlampunt hoger dan 23°C en ten hoogste 55°C
 - K3: Vloeistoffen met een vlampunt hoger dan 55°C en ten hoogste 100°C
 - K4: Vloeistoffen met een vlampunt hoger dan 100°C
- Balansleiding: aangegeven is of een verwarming van dampleiding nodig is (tot -10°C)
 - O: onverwarmd
 - V: verwarmd
- Absorptie: oplosbaarheid in water en/of koolwaterstoffen (olie, organische oplosmiddelen) geschikt voor absorptie (gaswassing)

⁴⁴ Voor een uitgebreide beschrijving de technieken wordt verwezen naar '[Luchtemissie beperkende technieken, Handreiking](#)' van 24 november 2021

⁴⁵ Publicatierreeks gevaarlijke stoffen 29:2016

- Adsorptie met TW: geschiktheid voor adsorptie aan actiefkool met / zonder terugwinning is aangegeven
 - A⁴⁶: regeneratie met stoom is mogelijk *met* terugwinning
 - B⁴⁷: regeneratie met stoom is mogelijk *zonder* terugwinning (afvalwater)
- Damp: concentratie in de damp bij 15,6°C (ETBE bij 25°C)
- LEL: met het oog op verbranding (thermische oxidatie) is de onderste explosiegrens aangegeven
- Therm. oxidatie: geschikt voor thermische oxidatie
- TW 99%: temperatuur voor 99% terugwinning (cryocondensatie)

Een ander aspect van dampbehandeling is de verenigbaarheid van chemische productgroepen (ook compatibiliteit genoemd). Problemen zijn op dit punt niet te verwachten aangezien het in alle gevallen om weinig reactieve stoffen gaat. Dit geldt zeker voor de aromatische en verzadigde koolwaterstoffen en in mindere mate voor onverzadigde koolwaterstofketens (olefinen). Deze laatste kunnen reageren met sterke zuren en basen maar aangezien de dampen hiervan niet te zamen met koolwaterstofdampen worden behandeld is verenigbaarheid van chemische productgroepen verder buiten beschouwing gelaten.

4.4 Dampafzuiging

4.4.1 Dampdebiet en verwarming

Voor alle dampverwerkingstechnieken geldt dat de damp moet worden afgezogen. Het afgezogen volume moet in overeenstemming zijn met de verwerkingscapaciteit van de DVI en mag niet leiden tot onaanvaardbare onderdruk in de afgezogen producttank. Daarbij is de gassnelheid beperkt tot 17 m/s om statische oplading van de damp te voorkomen. Voor een kenmerkende leidingdiameter van 20 cm (8 duim) komt dit overeen met 2.000 m³/uur. Bij vaste installaties zijn pompdebieten, en daarmee dampdebieten, tot 1.500 m³/uur gangbaar.

Omdat productdampen zwaarder zijn dan lucht zal de damp onderin de producttank worden afgezogen. Voor het afzuigen is op de kade een ventilator nodig met een capaciteit van ordegrootte 500 – 1.000 m³ per uur. Het is gebruikelijk om hiervoor een elektrisch aangedreven ventilator in te zetten met vermogen van ordegrootte 10 kW.

De dampleidingen van benzeen moeten worden verwarmd in winterse omstandigheden, gelet op het smeltpunt van benzeen (5,5 °C).

4.4.2 Ontgassingsduur

De dampverwerkers geven aan dat de ontgassingsduur overeenkomt een ventilatievoud van 2,5 – 5 afhankelijk van de verzadigingsgraad van de damp. Als gebruikelijke praktijkwaarden voor de duur van het ontgassen van een binnenvaarttanker van 5.000m³ met benzine als voorlading wordt ordegrootte 24 uur aangegeven voor de meeste technieken, met uitzondering van de technieken

⁴⁶ Kookpunt tussen ca. 30-100°C en oplosbaarheid in water beneden 3°C

⁴⁷ Kookpunt tussen ca. 30-100°C en oplosbaarheid in water boven 3°C

die sterke verdunning van verzadigde damp (FTO en KO). Voor die technieken wordt aangegeven dat de dampbehandelingsduur een factor twee hoger is.

4.4.3 Technieken om verdamping te beperken

De damp die bij ontgassen vrijkomt, is afkomstig van:

- Damp die bij aanvang aanwezig is in de dampruimte van de producttank
- Damp die na aanvang ontstaat door verdamping van vloeistof op de bodem van de product-tank

Het is gebruikelijk dat binnenvaarttankers over een pomp met nalens beschikken. In het ADN zijn hierover regels gesteld. Het restant aan vloeistof is dan beperkt tot 50 – 150 liter. Dit laatste komt overeen met een potentieel dampvolume van ca. 60.000 m³ van 10%LEL (benzine). Dit illustreert dat restanten vloeistof sterk van invloed zijn op de duur van het ontgassen en op toename van de concentratie na het ontgassen.

In de meeste gevallen zal de producttank na het ontgassen droog moeten zijn om de volgende lading te kunnen ontvangen doordat de vorige lading niet verenigbaar is met de volgende. Dit kan bij vluchtige stoffen worden bereikt met ontgassen.

Wassen

Een andere benadering bestaat uit het wassen van de ladingtank met bijvoorbeeld water. Hiermee kan het product uit de ladingtank worden gespoeld zodat er geen product meer achterblijft en de producttank schoon is voor de vervolglading. Wassen met water veroorzaakt afvalwater dat zal moeten worden gehandeld, bijvoorbeeld in een havenontvangstinstallatie voor de ontvangst en verwerking van scheepsafvalstoffen. Waswater met gechlloreerde koolwaterstoffen is aanzienlijk duurder om te laten verwerken dan bijvoorbeeld afvalwater met benzine.

Besproeien met dampremmend middel

Indien de producttank niet 'droog' hoeft te zijn kan de verdamping kan worden tegengegaan door een nevel in de producttank te sproeien die zorgt voor een film op de productvloeistof, wat de verdamping remt. Volgens het veiligheidsinformatieblad van een dergelijk dampremmend product⁴⁸ gaat het om een niet-toxisch, niet-reactief, niet-brandbaar en biologisch afbreekbaar product en dat het geen invloed heeft op de productkwaliteit van de volgende lading. De benodigde vloeistof varieert (0,5-1,5 liter/uur) afhankelijk van onder andere de vluchtigheid van het product, de tanktemperatuur en tankoppervlakte met resterende productvloeistof.

4.5 Gaswassing

De werking van een gaswasser (scrubber) berust op het oplossen van een gas of damp in een vloeistof (absorptie). De wasvloeistof is vaak water (al dan niet met chemicaliën), wat geschikt is voor ethanol maar niet geschikt is voor de aardolieproducten en gehalogeneerde koolwaterstoffen. Koolwaterstoffen zoals gasolie zijn wel mogelijk om de damp van aardolieproducten te absorberen. Gaswassing zou bijvoorbeeld kunnen worden toegepast als behandelingsstap al dan niet in

⁴⁸ Mourik, NanoVapor, tankSafe

combinatie met een andere techniek, bijvoorbeeld door het vernevelen van olie of door te wassen in een gangbare gaswasser (scrubber). De vernevelde oliedruppels kunnen een deel van de benzedamp absorberen waardoor de concentratie met name in de eerste fase sneller zal dalen.

Productterugwinning is in principe mogelijk middels destillatie waarin bijvoorbeeld benzine weer van de olie kan worden gescheiden. In de praktijk wordt gaswassing van aardolieproducten en gehalogeneerde koolwaterstoffen niet toegepast bij tankopslagbedrijven of bij het ontgassen. Bijvoorbeeld ruimtebeslag en ontbreken van infrastructuur zijn belemmerende factoren bij mobiele toepassing. Deze techniek is niet afzonderlijk beschouwd in dit rapport.

4.6 Adsorptie

4.6.1 Algemeen

Er zijn verschillende adsorptiemiddelen, waarvan actief kool de meest toegepaste is met de kanttekening dat zeolieten gangbaar zijn bij gehalogeneerde koolwaterstoffen. De systemen zijn in verschillende uitvoeringen beschikbaar, waarbij er onderscheid kan worden gemaakt in systemen waarbij continue regeneratie van het adsorptiemiddel is geïntegreerd en systemen waarbij de regeneratie/ vernietiging gescheiden van het adsorptieproces plaatsvindt.

Een adsorptiefilter kan geplaatst worden als enige techniek. Adsorptiefilters zijn ook geschikt voor toepassing als tweede reinigingsstap van een afgasstroom waarbij een andere techniek eerst de grootste vracht verontreiniging al verwijderd heeft, bijvoorbeeld door cryocondensatie. Het adsorptiefilter dient dan om de emissieconcentratie tot onder de emissiegrenswaarde te brengen.

Tabel 4.4 – Toepassing van adsorptie bij ontgassen

Aspect	Beschouwing
Producten	<ul style="list-style-type: none"> • Geschikt voor actief kool: benzeen, benzine en bestanddelen zoals ethanol en MTBE • Geschikt voor zeoliet: gehalogeneerde koolwaterstoffen
Dampaanbod	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibel in debietwisselingen • Mengsels van verschillende gassen kunnen leiden tot verzadiging van een bepaalde component • Minder geschikt voor hoge ingangconcentraties door de snelle verzadiging en concentratiewisselingen
Afmetingen	Geschikt voor mobiele toepassing
Investerings (orde-grootte)	<ul style="list-style-type: none"> • 10.000- 50.000 per filter (5.000 m³/uur) • Mobiele filters op huurbasis komen ook voor. Kosten hiervan liggen tussen 10 – 100 euro per filter per dag.
Operationele kosten (ordegrootte)	<ul style="list-style-type: none"> • 12.500 euro per jaar
Betrouwbaarheid	Geen bijzonderheden anders dat er gevaar voor brand is bij actiefkool
Validatie	Adsorptie is de gangbare techniek voor dampterugwinning (VRU) bij vaste installaties maar ongebruikelijk voor mobiele toepassing bij het ontgassen van bijvoorbeeld opslag-tanks.
Energie	Elektriciteit voor aandrijven van een pomp, leidingverwarming (tracing) en eventueel een ventilator, eventueel koeling van het adsorptiebed, eventueel vacuümpompen.
Productterugwinning	In combinatie met een gaswasser met product/absorbent wordt product bij tankopslagbedrijven teruggewonnen; voor mobiele installaties wordt een dergelijk combinatie niet haalbaar geacht; het verzadigde adsorptiemiddel zou wel kunnen worden afgevoerd naar een verwerker waar de adsorbeerde damp wordt teruggewonnen.
Nuttig gebruik van de energie	Niet van toepassing
Verbruik	Niet van toepassing
Afvalwater, afval, luchtverontreiniging	Afval: omdat regeneratie in veel gevallen niet eenvoudig mogelijk is, zal het verzadigde adsorptiemateriaal als gevaarlijk afval worden afgevoerd voor reactivatie/vernietiging. Luchtverontreiniging voor regeneratie door de opwekking van elektriciteit voor vacuüm, stoomproductie en voor het reactiveren van het adsorptiemateriaal of vernietigen van het actiefkool (verbranden).

4.6.2 Toepassing als dampverwerkingstechniek voor ontgassing

Adsorptie is de meest toegepaste techniek voor het terugwinnen van benzinedampen bij tankopslagbedrijven. Daarbij worden de actiefkooladsorptiekolommen lokaal geregenereerd, bijvoorbeeld met vacuüm (desorptie) en een gaswasser met product/absorbent voor de eigenlijke terugwinning. Om het rendement te verhogen is het gebruikelijk om de kolom actief te koelen. Vacuüm wordt met elektrische vacuümpompen opgewekt en vergt een aanzienlijk elektrisch vermogen.

Een dergelijke opzet om damp terug te winnen is nauwelijks te realiseren bij een mobiele installatie. Toepassing van adsorptie als primaire techniek voor ontgassen zonder dampsterugwinning is in principe wel mogelijk met externe reactivatie van het adsorptiemateriaal.

Met adsorptie is het mogelijk om de eindconcentratie te verlagen tot 10%LEL en de algemene emissiegrenswaarde zoals blijkt uit bijvoorbeeld het BREF-document⁴⁹ voor het behandelen van afgassen uit de chemische industrie (Figure 3.20).

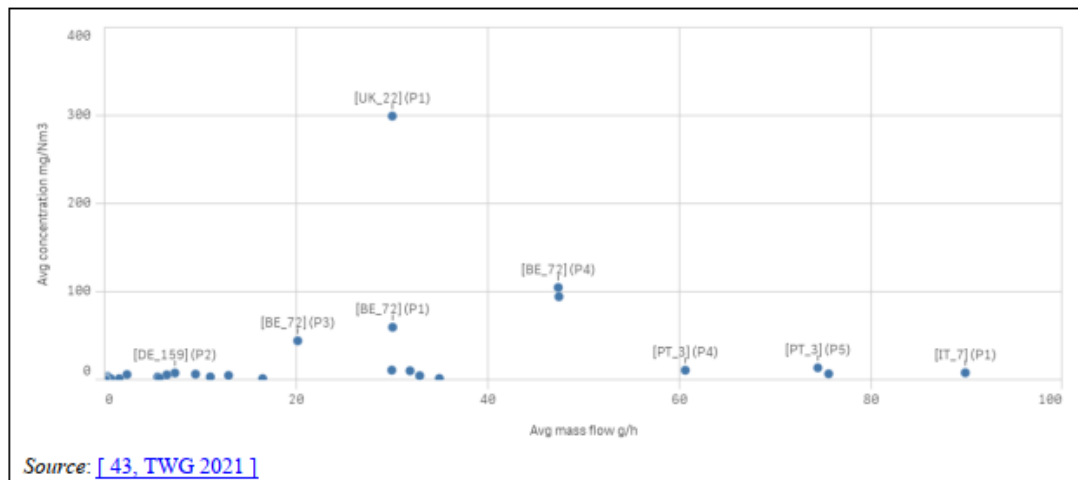


Figure 3.20: TVOC concentration versus mass flow, for mass flows < 100 g/h when adsorption is used as the final waste gas treatment

4.7 Condensatie

4.7.1 Cryocondensatie

4.7.1.1 Algemeen

Bij cryocondensatie wordt een afgasstroom gekoeld tot temperaturen van ordegrootte -30°C – -90°C. De koude kan worden verkregen door het verdampen van vloeibare stikstof of met een elektrisch aangedreven koelmachine. Door de lage temperatuur kan het rendement op VOS-condensatie hoog zijn, tot meer dan 99%. Het verdampte stikstof zorgt daarnaast voor een deken van inert gas over de gecondenseerde VOS, wat gunstig kan zijn in verband met productkwaliteit of brandveiligheid.

De waterdamp in de lucht van de ladingtank zal door de lage temperatuur condenseren of bevriezen⁵⁰. Het condenswater is verontreinigd met koolwaterstoffen. Een lege ladingtank van 5.000 m³ bevat 36 kg waterdamp bij 20°C en 50% relatieve luchtvochtigheid. Bij vochtige lucht kan dit tot het dubbele oplopen. In tegenstelling tot andere technieken hoeft geen verse buitenlucht aangevoerd te worden maar kan de behandelde damp circuleren over de ladingtank, al dan niet aangevuld met stikstof, zodat er geen extra water meer in het systeem komt. Het is gebruikelijk om

⁴⁹ Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Gas Management and Treatment Systems in the Chemical Sector, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/220326, JRC131915.

⁵⁰ Het is gebruikelijk om met meerdere koeleenheden te werken zodat kan worden overgeschakeld indien een van de eenheden bevroert.

Kenmerk R001-1292542RAX-V05

water in een voorkoelstap af te scheiden maar er kan ook worden gekozen om in één stap te koelen met parallel koelers en deze wisselend te laten ontdooien en het dooiwater op te vangen.

Dampverwerkers geven aan dat het condenswater wordt toegevoegd aan het gecondenseerde product. Indien dit niet mogelijk is, wordt het condenswater als afvalwater naar een erkend verwerker afgevoerd of als afvalwater geleverd aan het schip. Het BREF-document⁵¹ over behandeling van afvalwater en afgassen geeft een concentratie van 200 – 1.000 mg/liter aan COD aan.

Met cryocondensatie als enige techniek is het mogelijk om de concentratie tot 10%LEL te verlagen. Er kan voor worden gekozen om een tweede reiniging, bijvoorbeeld gebaseerd op adsorptie, in te zetten om sneller te ontgassen door aanzuigen van stikstof of verse buitenlucht. De behandelde lucht wordt dan niet naar de ladingtank gecirculeerd maar naar de buitenlucht geleid. Dit betekent wel dat de restconcentratie van de tweede reiniging moet voldoen aan de emissiegrenswaarde, die aanzienlijk strenger is dan 10%LEL.

Tabel 4.5 – Toepassing van cryocondensatie bij ontgassen

Aspect	Beschouwing
Producten	<ul style="list-style-type: none"> • Geschikt voor vluchtige producten zoals benzine en bestanddelen zoals ethanol en MTBE • Geschikt voor gehalogeneerde koolwaterstoffen
Dampaanbod	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibel in debietwisselingen en in concentratiewisselingen
Afmetingen	Geschikt voor mobiele toepassing
Investerings (orde-grootte)	500.000 €
Operationele kosten (ordegrootte)	Bepaald door het verbruik aan vloeibaar stikstof, respectievelijk elektriciteit
Betrouwbaarheid	Voorzieningen om aangevroren water of gestolde benzeen ⁵² op de cryocondensator tussentijds te ontdooien kunnen nodig zijn; een installatie met vloeibare stikstof heeft minder bewegende onderdelen dan een koelmachine en vergt daardoor minder kans op een mechanische storing.
Validatie	Cryogene condensatie met vloeibare stikstof is een techniek die zowel op tankopslagbedrijven als ook op binnenvaart- en zeeschepen wordt toegepast. Cryogene condensatie met een koelmachine is een techniek wel getest is bij binnenvaartschepen maar nauwelijks in de praktijk is toegepast.
Energie	<p>Cryogene koeling met stikstof verbruikt op zich geen energie maar dit moet in samenhang worden gezien met de energie die nodig is voor het vloeibaar maken van stikstof.</p> <p>Een koelmachine wordt elektrisch aangedreven; de benodigde elektriciteit zal ter plekke moeten worden opgewekt met een diesel/propaangenerator voor zover er geen walstroom beschikbaar is.</p> <p>De koelingscapaciteit bedraagt ca. 40 – 160 kW.</p>

⁵¹ BAT Reference Document for Common Waste Water and Waste Gas Treatment/Management Systems in the Chemical Sector; 2016; blz. 346

⁵² Het smeltpunt van benzeen is 5,5 °C bij normale druk

Aspect	Beschouwing
Productterugwinning	Ja
Nuttig gebruik van de energie	Niet van toepassing
Verbruik	Vloeibaar stikstof
Afvalwater, afval, luchtverontreiniging	Afvalwater door condensatie van vocht in de lucht, verontreinigd met VOS Luchtverontreiniging voor de opwekking van elektriciteit voor het vloeibaar maken van stikstof.

4.7.1.2 Proefneming met ontgassen door cryocondensatie

Dampverwerking van ontgassing met condensatie is onderzocht in de proefnemingen van 2020 [Taskforce 2021]. De techniek van het circuleren van de dampen over het schip en de DVI betekent dat er gedurende het overgrote deel van de proefneming geen sprake van emissies is. Pas als met de circulatie wordt gestopt en de lucht na condensatie over het koolfilter wordt geleid is er sprake van een emissie. Dit geldt voor de proefneming met benzine als voorlading. Bij de proefneming met ethanol en hexaan is circulatie gedurende de gehele ontgassing in stand gehouden en was er geen emissie⁵³.

De uitstoot naar de lucht van de dampbehandelingstechniek is weergegeven in de volgende tabel. Hierbij moet worden opgemerkt dat de concentraties betrekking hebben op actiefkoolfiltratie aangezien deze techniek is toegepast in de laatste fase van de dampbehandeling. In de eerste rijen onder de kolomkoppen zijn de algemene emissiegrenswaarden en ondergrenzen vermeld volgens Bal, paragraaf 5.4.4.

Tabel 4.6 – Uitstoot naar de lucht van de dampbehandelingstechniek (cryocondensatie)

Referentie	Voorgaande lading	Afgas			
		VOS [mg/Nm ³]	Benzeen [mg/Nm ³]	NOx [mg/Nm ³] 3% O ₂	CO [mg/Nm ³]
Algemene grenswaarde (ondergrens)		50 (250 kg/jr) 150*	1 (1,25 kg/jr)	100 (1000 kg/jr)	n.v.t.
G	Benzine	46	<1	n.v.t.	n.v.t.
H	Benzine	14	<1	n.v.t.	n.v.t.
J	Ethanol	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
K	Hexaan	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.

n.v.t.: niet van toepassing

* Waarde voor benzinedampsterugwinning

De volgende conclusies kunnen worden getrokken voor benzine:

- VOS: voldoet aan de emissiegrenswaarde
- Benzeen: voldoet aan de emissiegrenswaarde

⁵³ Een geringe emissie is te verwachten van de condensatie opvangtank vanwege verdringing door toevoer van het condensaat. Deze emissies worden echter als niet significant beschouwd.

- De eindconcentratie ($< 50 \text{ mg/Nm}^3$) is veel lager dan de vereiste AFVL-waarde (ca. 1.000 mg/Nm^3)

De resultaten zijn in overeenstemming met de ervaring met adsorptietechnieken (zie paragraaf 4.6). Daarbij wordt aangegeven dat kenmerkende waarde voor terugwinning 90% tot meer dan 99% zijn (paragraaf 3.3.2.5 in het BREF-document⁵⁴). Overigens kunnen, afhankelijk van het product en de vluchtigheid daarvan, de VOS-concentraties met alleen de cryocondensatie als techniek voldoen aan de algemene emissiegrenswaarde, zoals aangegeven in het voorgenoemde BREF-document, Figure 3.23.

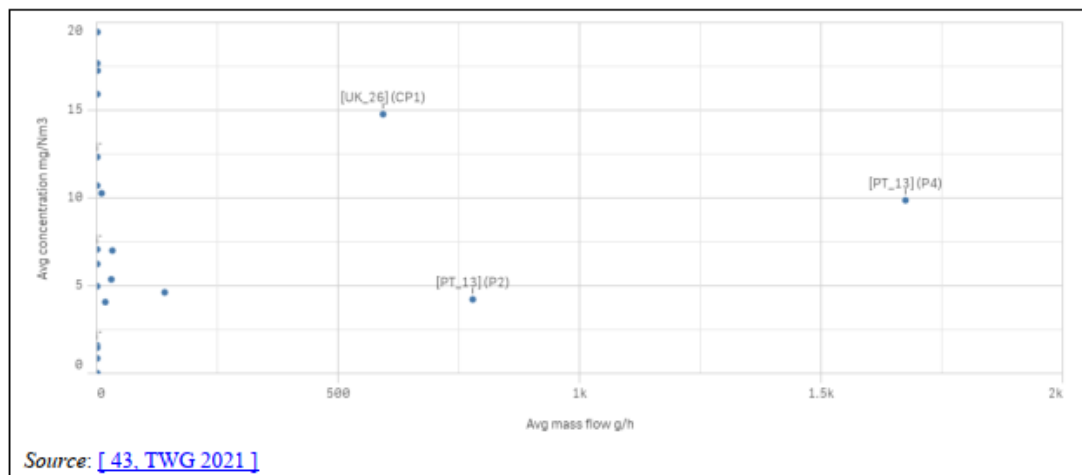


Figure 3.25: TVOC concentration versus mass flow, for concentrations $< 20 \text{ mg/Nm}^3$ when condensation is used as the only waste gas treatment technique

4.7.2 Condensatie door compressie

Een andere condensatietechniek is compressie van de damp. Het is gebruikelijk om de druk stapsgewijs op te voeren. Door het samendrukken van de damp neemt de temperatuur van de damp toe en ook bij het condenseren komt condensatiewarmte vrij waardoor de temperatuur nog verder oploopt. De damp wordt tussen de compressiestappen gekoeld met oppervlaktewater. De drukken bedragen ca. 30 bar voor zeer vluchtige stoffen tot ca. 60 bar voor vluchtige stoffen. Het rendement is aanzienlijk lager dan bij cryocondensatie en bedraagt de ordegrrootte 55 – 90% afhankelijk van het product⁵⁵ en de behandelingsfase

Een tweede reinigingsstap, bijvoorbeeld gebaseerd op adsorptie of een verbrandingstechniek, is vrijwel altijd nodig om de concentratie tot 10%LEL te laten dalen.

⁵⁴ Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Gas Management and Treatment Systems in the Chemical Sector, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/220326, JRC131915.

⁵⁵ Waarden hebben betrekking op propaan/propeen.

4.8 Verbranding (thermische oxidatie)

4.8.1 Algemeen

Werkingsprincipe

Het werkingsprincipe berust op volledige oxidatie van alle brandbare stoffen in het afgas met zuurstof in de lucht. Thermische naverbranding is een behandelingstechniek waarbij een afgasstroom die brandbare stoffen bevat wordt gemengd met lucht, eventueel zuurstof, tot boven het zelfontbrandingspunt in een verbrandingskamer. De gassen worden voor 0,1 – 3 seconden op hoge temperatuur gehouden, ordegrootte 750 – 1.200°C. Met een passende katalysator is oxidatie bij een lagere temperatuur, 300 – 600 °C mogelijk. Als het afgas te weinig VOS bevat om het verbrandingsproces zelf op gang te houden, is steunbrandstof nodig. In de praktijk van het ontgassen gaat die om vloeibaar gemaakt propaan, butaan of LPG. De benodigde warmte kan ook elektrisch worden geleverd. Dit vergt grote vermogens die de capaciteit van het net op de meeste geschikte ligplaatsen te boven gaat. Een alternatief is het opwekken van het benodigde vermogen met een dieselgenerator.

Thermische oxidatie van gehalogeneerde koolwaterstoffen is praktisch niet haalbaar voor de relatief kleine mobiele installaties. Bij de oxidatie ontstaan chloriden en mogelijk ook dioxinen, wat een uitgebreide nabehandeling vergt. De gevormde chloriden zijn sterk corrosief waardoor de materiaaluitvoering aanzienlijk duurder wordt.

Thermisch vermogen

Bij thermische oxidatie is de verbrandingswaarde van belang omdat dit samen met het debiet bepalend is voor het thermisch vermogen van de verbrandingsinstallatie. Het thermisch vermogen dat overeenkomt met het debiet van onverdunde verzadigde damp bij 15°C is in de volgende tabel uitgewerkt.

Tabel 4.7 – Benodigd thermisch vermogen (onverdunde verzadigde damp bij aanvang; 15°C)

Procesconditie	Eenheid	Benzine	Benzeen	Ethanol
Verbrandingswaarde	MJ/kg	44,6	41,9	26,8
Dampdichtheid (verzadigd 15°C)	kg/Nm ³	0,885	0,445	0,088
	MJ/Nm ³	39,5	18,7	2,4
Thermisch vermogen bij				
• bij 150 Nm ³ /uur	kW	1.645	777	98
• bij 500 Nm ³ /uur	kW	5.483	2.591	326
• Bij 800 Nm ³ /uur	kW	8.772	4.145	522

Ontgassing

Aangezien er bij thermische oxidatie geen damp wordt teruggevoerd is de dampbehandelings-techniek niet van invloed op de effectiviteit van het ontgassen. De verlaging van de dampconcentratie in de producttanks wordt alleen bereikt door het aanzuigen van buitenlucht in de product-tank.

Varianten

In tegenstelling tot dampterugwinning hebben veel mobiele verbrandingstechnieken als bezwaar dat de behandelde damp geen nuttige toepassing kent en zonder toegevoegde waarde wordt vernietigd. Dit bezwaar kan worden verkleind door de verbrandingstechniek te combineren met gedeeltelijke dampterugwinning, nuttig gebruik zoals voor de opwekking van elektriciteit.

De CO₂-voetafdruk kan worden verkleind door gebruik van duurzaam opgewekte elektriciteit (groene stroom), vloeibare stikstof geproduceerd met groene stroom, biopropaan of biodiesel (HVO). Het effect op de opwarming van de aarde zal hierdoor kleiner zijn dan bij de gebruikelijke varianten gebaseerd op fossiele brandstoffen.

Verwachte ontwikkelingen

Bij de verbranding van koolwaterstoffen in de damp ontstaan water en kooldioxide, broeikasgasen. Kooldioxide kan technisch worden afgevangen en langdurig worden opgeslagen of vastgelegd maar dit wordt in de praktijk niet toegepast voor lage CO₂-uitstoot zoals dampbehandeling van ontgassing gelet op de hoge kosten.

Het rookgas van de verschillende verbrandingstechnieken bevat een aanzienlijke hoeveelheid warmte. Met uitzondering van de omsloten fakkel (VCU) kan deze warmte deels nuttig worden gebruikt middels bijvoorbeeld een organische rankinecyclus (ORC) gekoppeld aan een generator om elektriciteit op te wekken. Benutten van de restwarmte van mobiele dampverwerkingsinstallaties is echter ongebruikelijk. Daar komt bij dat er weinig mogelijkheden zijn om de opgewekte elektriciteit aan een gebruiker of het net te kunnen leveren. De opgewekte elektriciteit kan worden opgeslagen in batterijen ter grootte van een standaard container, containerbatterij genoemd. Het voordeel van de batterij is dat de opgewekte elektriciteit elders volgens behoefte aan een gebruiker of het net kan worden geleverd. In de praktijk worden containerbatterijen niet toegepast voor dampverwerking van ontgassing gelet op de hoge kosten.

4.8.2 Eenvoudige naverbrander (VCU)

4.8.2.1 Algemeen

Thermische oxidatie in een mobiele eenvoudige naverbrander (VCU⁵⁶) bestaat uit een omsloten⁵⁷ verbrandingsruimte/fakkel. In de verbrandingsruimte wordt de damp in de afgezogen lucht met een vlam verbrand. In verband met procesbeheersing zijn meerdere verbrandingsruimtes gebruikelijk in een VCU. De techniek kent geen maximum aan de inlaatconcentratie maar heeft een steungas nodig om de verbranding te onderhouden bij lage dampconcentraties (stookwaarde lager dan ca. 10 – 14 g VOS/m³). Om een zo volledig mogelijke verbranding te bereiken wordt een grote overmaat⁵⁸ aan lucht aangehouden.

Er bestaan ook uitvoeringen met een katalysator zodat de verbranding/oxidatie bij een lagere temperatuur kan plaatsvinden en minder steunbrandstof nodig is en minder NO_x wordt gevormd.

⁵⁶ Vapour combustion unit

⁵⁷ Dit in tegenstelling tot een fakkel waar de verbranding niet omsloten plaatsvindt.

⁵⁸ Ordegrootte een factor 2 ten opzichte van stoichiometrische verbranding

Een mobiele VCU wordt veelal ingezet tijdens groot onderhoud in raffinaderijen, ontgassen van schepen, opslagtanks, leidingen of tijdens vervanging / onderhoud van vaste dampverwerkingsinstallaties (DVI).

Door de korte verblijftijd (tot ca. 0,3 s) en het minder gelijkmatig temperatuurprofiel in vergelijking met de andere verbrandingstechnieken is het verbrandingsrendement lager en kan de lage emissiegrenswaarde van 1 mg/m³ voor bijvoorbeeld benzeen niet worden gegarandeerd. De gangbare technieken om de uitstoot van onverbrande koolwaterstoffen en stikstofoxiden te beperken, zoals KO en SCR, zijn in de praktijk niet toepasbaar omdat het rookgas niet gekanaliseerd is zoals bij de overige verbrandingstechnieken, wat overigens ook meten van de concentratie bemoeilijkt. Selectieve niet-katalytische oxidatie door inspuiting van ureum of ammoniak in de damp voor de verbranding is wel mogelijk als techniek om de NO_x-uitstoot te beperken maar leidt tot een ammoniakconcentraties⁵⁹ die hoger zijn dan de algemene emissiegrenswaarde.

Tabel 4.8 – Toepassing van een eenvoudige naverbrander (VCU) als dampverwerking bij ontgassen

Aspect	Beschouwing
Producten	Geschikt voor alle niet-gehalogeneerde producten, met uitzondering van benzeen en vergelijkbare stoffen met een lage emissiegrenswaarde
Dampaanbod	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibel in debietwisselingen in combinatie met steunbrandstof • Weinig gevoelig voor storingen bij wisselende belastingen.
Afmetingen	Geschikt voor mobiele toepassing
Investerings (orde-grootte)	500.000 €
Operationele kosten	Bepaald door het gebruik van steungas
Energie	Steungas is nodig voor damp die niet meer autotherm kan branden
Betrouwbaarheid	Geen bijzonderheden gelet op het eenvoudige concept
Validatie	Mobiele VCU's zijn een uitgerijpt concept, waarvan de technologie bewezen is.
Productterugwinning	Niet van toepassing
Nuttig gebruik van de energie	Niet van toepassing
Verbruik	steungas als de VCU niet autotherm kan worden bedreven
Afvalwater, afval, luchtverontreiniging	Luchtverontreiniging door de rookgassen

4.8.2.2 Proefneming met ontgassen

Dampverwerking van ontgassing met VCU is onderzocht in de proefnemingen van 2020 [Taskforce 2021]. De uitstoot naar de lucht van deze dampbehandelingstechniek is weergegeven in de volgende tabel. In de eerste rijen onder de kolomkoppen zijn de algemene emissiegrenswaarden en ondergrenzen vermeld volgens Bal, paragraaf 5.4.4.

⁵⁹ Ter indicatie orde-grootte 35 mg/Nm³

Tabel 4.9 – Uitstoot naar de lucht van de dampbehandelingstechniek (VCU)

Referentie	Voorgaande lading	Rookgas				
		VOS [mg/Nm ³]	Benzeen [mg/Nm ³]	NOx [mg/Nm ³] 3% O ₂	NOx [mg/Nm ³] 12,8% O ₂	CO [mg/Nm ³]
Algemene grenswaarde* (ondergrens)		50 (250 kg/jr)	1 (1,25 kg/jr)	100 (1000 kg/jr)		n.v.t.
A	Benzine	0,65	<0,0-4,1	162**	73,4**	n.b.

n.b.: niet bekend; n.v.t.: niet van toepassing

* Bal artikel 5.34 (omrekenen naar zuurstof) De emissies van verbrandingsprocessen worden omgerekend naar afgas met een volumegehalte aan zuurstof van 3% bij een stookinstallatie⁶⁰ met een gasvormige brandstof.

** Onduidelijk of de gerapporteerde waarde betrekking heeft of 12,8% O₂ of op 3%

De volgende conclusies kunnen worden:

- VOS: voldoet aan de emissiegrenswaarde
- Benzeen: onduidelijk of wel/niet voldaan is aan de emissiegrenswaarde door tegenstrijdigheid met de gemeten VOS-concentratie
- NOx: onduidelijk of wel/niet voldaan is aan de emissiegrenswaarde

Overigens kan met een eenvoudige naverbrander (VCU) voldaan worden aan de algemene emissiegrenswaarden voor VOS zoals blijkt uit bijvoorbeeld het BREF-document⁶¹ voor het behandelen van afgassen uit de chemische industrie (Figure 3.49; straight TO).

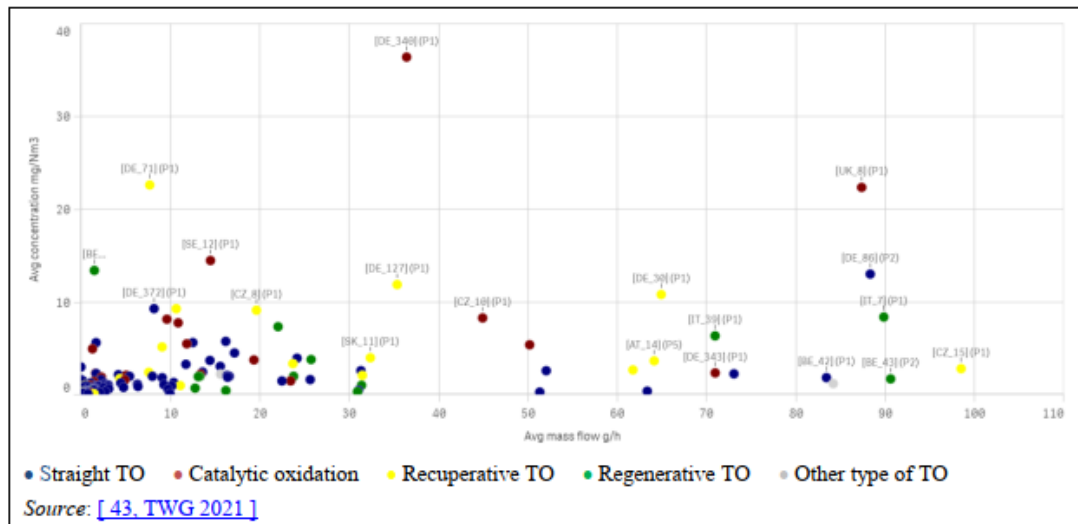


Figure 3.49: Comparison of TVOC emission levels from catalytic oxidation and different types of thermal oxidation

De NOx-concentratie in het rookgas van een eenvoudige naverbrander (VCU) ligt kritischer maar gebruikelijk is dat de NOx-concentratie voldoet aan de algemene emissiegrenswaarden van 100

⁶⁰ Stookinstallatie: technische eenheid waarin brandstoffen worden geoxideerd om de warmte die zo wordt opgewekt te gebruiken

⁶¹ Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Gas Management and Treatment Systems in the Chemical Sector, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/220326, JRC131915.

mg/Nm³ (droog, 3% zuurstofovermaat) zoals blijkt uit het voorgenoemde BREF-document voor het behandelen van afgassen uit de chemische industrie (Figure 3.51; straight TO).

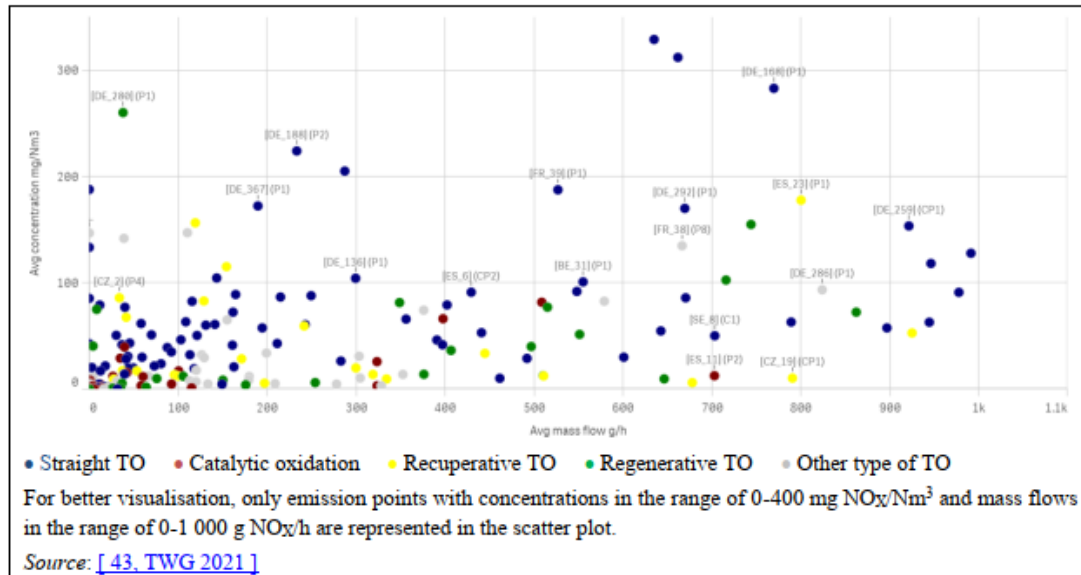


Figure 3.51: Comparison of NO_x emission levels from catalytic oxidation and different types of thermal oxidation (TO)

4.8.3 Vlamloze thermische oxidatie (FTO)

De vlamloze thermische oxidatie (FTO) verschilt van de traditionele thermische oxidatie (VCU) in zoverre dat de thermische oxidatie bij een lager zuurstofgehalte en bijgevolg lagere oxidatietemperatuur plaatsvindt. Het zuurstofgehalte wordt door menging en/of terugleiden van rookgassen verlaagd tot van 21% tot ca. 12%, wat explosiegevaar voorkomt. Vlamloze verbranding is gebaseerd op auto-oxidatie van koolwaterstoffen bij temperaturen boven de zelfontbrandingstemperatuur (650-700 °C) maar beduidend onder de verbrandingstemperaturen met een vlam (>1.500 °C). De techniek kent geen maximum aan de inlaatconcentratie maar heeft een steungas nodig om het verbrandingsproces te starten en de verbranding te onderhouden indien de stookwaarde lager is dan ca. 30 g VOS/m³.

Door de lagere verbrandingstemperatuur is de NO_x-uitstoot (<25 mg/m³) aanzienlijk lager dan bij een eenvoudige naverbrander (VCU). Door de homogenere warmteverdeling zijn uitstoot van CO (< 2 mg C/m³) en resterende koolwaterstoffen (VOS; < 2 mg/m³) eveneens lager dan bij een eenvoudige naverbrander (VCU).

Tabel 4.10 – Toepassing van FTO als dampverwerking bij ontgassen

Aspect	Beschouwing
Producten	Geschikt voor alle niet-gehalogeneerde producten
Dampaanbod	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibel in debietwisselingen in combinatie met steunbrandstof • Weinig gevoelig voor storingen bij wisselende belastingen.
Afmetingen	Geschikt voor mobiele toepassing
Investeringskosten	1.000.000
Operationele kosten	Steungas
Betrouwbaarheid	Geen bijzonderheden anders dan dat het luchtregeling aan hoge eisen moet voldoen om de wisselingen in dampconcentratie snel te kunnen opvangen
Validatie	De technologie wordt tot op heden vooral toegepast bij installaties met gassen biogas, stortgas en mijngas; dit zijn gassen met relatief lage verbrandingswaarde. Gericht op het ontgassen van binnenvaarttanks is de technologie nog in de ontwerp/bouwfase, waarna deze zal moeten worden getest.
Energie	Steungas als de verdunde damp niet autotherm kan worden geoxideerd
Productterugwinning	Niet mogelijk
Nuttig gebruik van de energie	Niet van toepassing
Verbruik	Steungas in het begin en als de FTO niet autotherm kan worden bedreven
Afvalwater, afval, luchtverontreiniging	Luchtverontreiniging door de rookgassen.

4.8.4 Regeneratieve thermische oxidatie (RTO)

4.8.4.1 Algemeen

Een regeneratieve naverbrander (RTO) gebruikt twee of meer keramische bedden. Het principe is dat de warmte van het gereinigde afgas wordt opgeslagen in het bed en nadien wordt afgegeven aan het te behandelen afgas. In de verbrandingsruimte wordt het afgas (indien noodzakelijk) verder verhit, zodat thermische oxidatie optreedt. Het hete gas dat de verbrandingsruimte verlaat, verwarmt het tweede keramische bed. Het afgekoelde gas kan hierna worden afgevoerd. Als het tweede bed voldoende is verhit, wordt de gasstroom omgekeerd, waardoor het tweede bed zorgt voor de opwarming van het te behandelen afgas en het eerste voor de afkoeling van het gereinigde afgas. Bij het omschakelen kan een piekmissie optreden. De keramische bedden kunnen uitgebreid worden met een katalysator om zo de efficiëntie van de techniek verder te verhogen.

De techniek kent een maximale inlaatconcentratie (25% LEL, orde grootte 10 g VOS/m³), en is door de hoge thermische efficiëntie vaak al autotherm bij 2-3 g VOS/m³. Voor ontgassing betekent dit dat verzadigde benzinedamp een factor 50 – 100 moet worden verdund, waardoor in de praktijk de behandelingsduur een factor twee toeneemt, wat de techniek minder geschikt maakt voor deze toepassing. Een regeneratieve naverbrander (RTO) als nabehandeling is wel geschikt. Voorafgaand aan het behandelen van de damp van de ladingtanks moeten de keramische bedden op temperatuur worden gebracht, wat gebruikelijk met steungas gebeurt. Opwarmen vergt 4 tot 6 uur.

Tabel 4.11 – Toepassing van RTO als dampverwerking bij ontgassen

Aspect	Beschouwing
Producten	Geschikt voor alle niet-gehalogeneerde producten
Dampaanbod	<ul style="list-style-type: none"> Weinig flexibel in debietwisselingen maar dit kan worden gecompenseerd door continu een hoog debiet met steunbrandstof aan te houden Minder geschikt voor hoge ingangconcentraties maar dit kan worden gecompenseerd door de damp te bufferen en/of te verdunnen met omgevingslucht. In de praktijk is een RTO gevoelig voor storingen bij wisselende belastingen. Bij stabiel bedrijf, bijvoorbeeld als nageschakelde techniek na dampterugwinning zijn er kenmerkend minder storingen
Afmetingen	Geschikt voor mobiele toepassing
Investeringskosten	1.500.000 €
Operationele kosten	Steungas
Betrouwbaarheid	Een RTO schakelt uit als de verbrandingswaarde van het te behandelen gas in de RTO te hoog is (systeembeveiliging); dit stelt hoge eisen aan de luchtregeling om de wisselingen in dampconcentratie snel te kunnen opvangen. Daarnaast treden de concentratiepieken op tijdens het overschakelen naar een ander keramische bed.
Validatie	Een RTO is gangbaar bij tankopslagbedrijven als nabehandeling voor het afgas van een dampterugwinningsinstallatie of damp van niet-vluchtige vloeistoffen met een sterke geur zoals stookolie. De techniek heeft zich bewezen als zelfstandige techniek in testen met het ontgassen van binnenvaarttankers maar is niet als dusdanig algemeen toegepast.
Energie	Steungas
Productterugwinning	Niet mogelijk
Nuttig gebruik van de energie	Niet van toepassing
Verbruik	Steungas voor het voorverwarmen voordat de damp kan worden behandeld (4 uur volgens opgave van leverancier) en steungas als de RTO niet autotherm kan worden bedreven
Afvalwater, afval, luchtverontreiniging	Luchtverontreiniging door de rookgassen (bij ontgassen of bij elektriciteitscentrale)

4.8.4.2 Proefneming met ontgassen

Dampverwerking van ontgassing met een RTO is onderzocht in de proefnemingen van 2020 [Taskforce 2021] waarbij condensatie als voorbehandelingsstap is toegepast. De uitstoot naar de lucht van de dampbehandelingstechniek is weergegeven in de volgende tabel. In de eerste rijen onder de kolomkoppen zijn de algemene emissiegrenswaarden en ondergrenzen vermeld volgens Bal, paragraaf 5.4.

Tabel 4.12 – Uitstoot naar de lucht van de dampbehandelingstechniek (thermische oxidatie)

Referentie	Voorgaande lading	Rookgas			
		VOS [mg/Nm ³]	Benzeen [mg/Nm ³]	NOx [mg/Nm ³] 3% O ₂	CO [mg/Nm ³]
Algemene grenswaarde* (ondergrens)		50 (250 kg/jr)	1 (1,25 kg/jr)	100 (1000 kg/jr)	n.v.t.
I	Benzine	19	0,3	2	n.b.

n.b.: niet bekend; n.v.t.: niet van toepassing

* Bal artikel 5.34 (omrekenen naar zuurstof) De emissies van verbrandingsprocessen worden omgerekend naar afgas met een volumegehalte aan zuurstof van 3% bij een stookinstallatie⁶² met een gasvormige brandstof.

De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- VOS: voldoet aan de emissiegrenswaarde
- Benzeen: voldoet aan de emissiegrenswaarde
- NOx: voldoet aan de emissiegrenswaarde

De resultaten voor VOS zijn in overeenstemming met de ervaring met een RTO zoals blijkt uit bijvoorbeeld het BREF-document⁶³ voor het behandelen van afgassen uit de chemische industrie (Figure 3.49; regeneratieve TO).

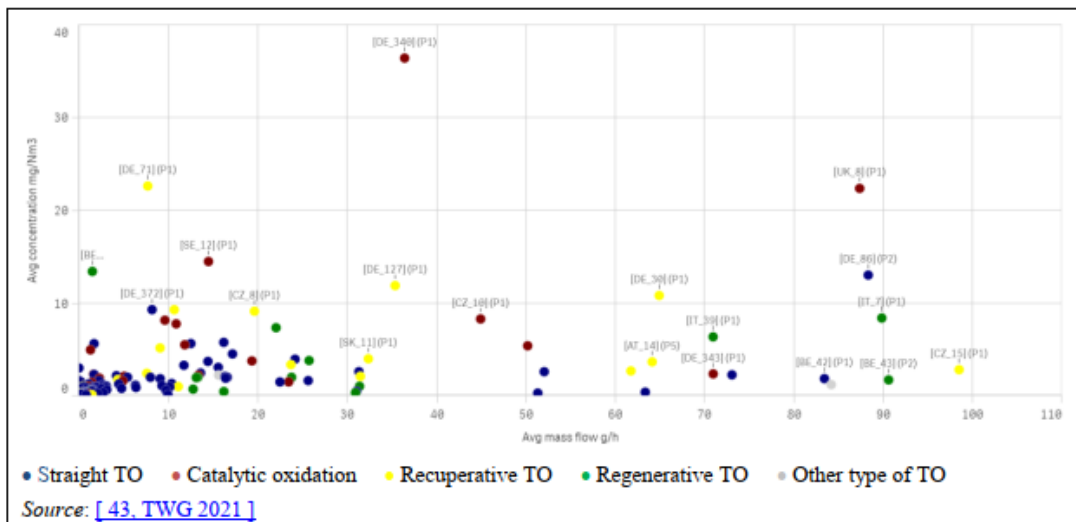


Figure 3.49: Comparison of TVOC emission levels from catalytic oxidation and different types of thermal oxidation

De NOx-concentratie in het rookgas van een RTO voldoet aan de algemene emissiegrenswaarden van 100 mg/Nm³ (droog, 3% zuurstofovermaat) zoals blijkt uit het voorgenoemde BREF-

⁶² Stookinstallatie: technische eenheid waarin brandstoffen worden geoxideerd om de warmte die zo wordt opgewekt te gebruiken

⁶³ Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Common Waste Gas Management and Treatment Systems in the Chemical Sector, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023, doi:10.2760/220326, JRC131915.

document voor het behandelen van afgassen uit de chemische industrie (Figure 3.51; regeneratieve TO).

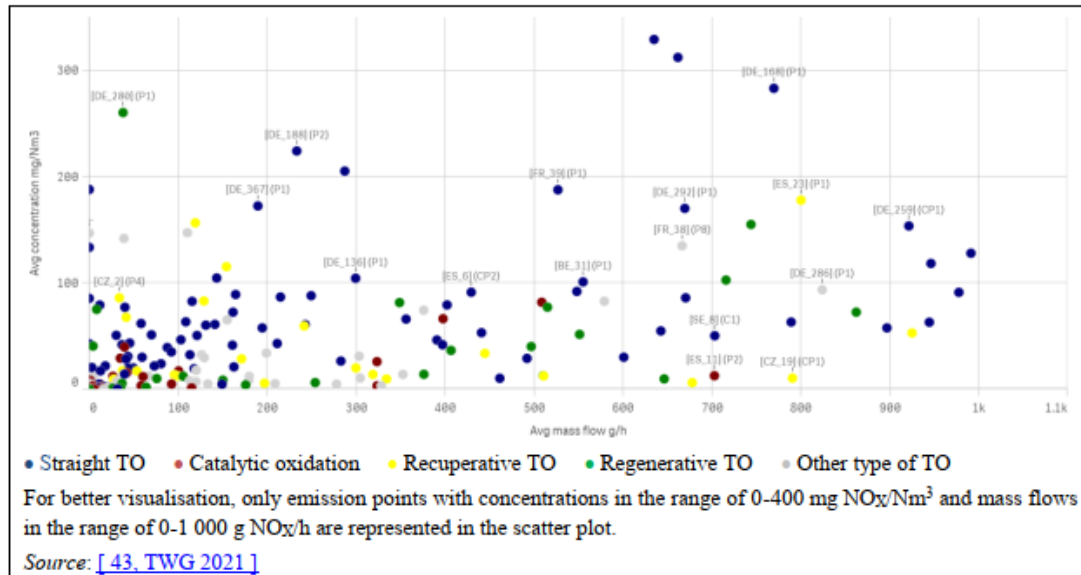


Figure 3.51: Comparison of NO_x emission levels from catalytic oxidation and different types of thermal oxidation (TO)

4.8.5 Katalytische oxidatie

Het principe van katalytische oxidatie (KO) is verbranding van koolwaterstoffen met zuurstof onder invloed van een katalysator die de vereiste verbrandingstemperatuur verlaagd naar 300°C – 400°C, maximaal 600°C. De katalysator is aangebracht op een keramische bed en gevoelig voor temperatuurschokken, hoge temperatuur en ‘vergiftiging’ door bijvoorbeeld zwavelverbindingen. Zwavelverbindingen kunnen middels loogwassing als voorbehandeling worden afgevangen.

De techniek kent een maximale inlaatconcentratie (ordegrootte 10 g VOS/m³), en is door de hoge thermische efficiëntie vaak al autotherm bij 2-3 g VOS/m³. Voor ontgassing betekent dit dat verzadigde benzinedamp een factor 50 – 100 moet worden verdund, waardoor in de praktijk de behandelingsduur een factor twee toeneemt, wat de techniek minder geschikt maakt voor deze toepassing. Katalytische oxidatie als nabehandeling is wel geschikt. Voorafgaand aan het behandelen van de damp van de ladingtanks moet het katalysatorbed op temperatuur worden gebracht. Dit kan elektrisch of met behulp van steungas.

Er zijn ten tijde van het schrijven geen aanbieders voor dampbehandeling door katalytische oxidatie.

4.8.6 Gasmotor

4.8.6.1 Algemeen

Nuttig gebruik van de energie is mogelijk bij toepassing van een gasmotor gekoppeld aan een elektriciteitsgenerator. Volgens de definitie van het Bal omvat het begrip gasmotor twee varianten van een verbrandingsmotor:

- Werking door vonkontsteking volgens Ottocyclus
- Werking door compressieontsteking voor zover de motor geschikt is om zowel gasolie (diesel) als damp als brandstof ('dual-fuelmotor') te gebruiken

Een gasmotor kan als basis worden ingezet voor het verbranden van koolwaterstoffendamp. De gasmotor met vonkontsteking is ontworpen voor verzadigde damp van bijvoorbeeld benzine of LPG (propan) en kan onverdund ook verzadigde benzinedamp verwerken waarbij de damp met omgevingslucht (verbrandingslucht) wordt gemengd. Met minder verzadigde damp hoeft er minder omgevingslucht te worden bijgemengd. Als de stookwaarde van de damp te laag wordt om de verbranding in de gasmotor in stand te houden (te arm mengsel) moet propan worden bijgemengd. In geval van een dual-fuelmotor is altijd een beperkte hoeveelheid⁶⁴ gasolie nodig ongeacht de verzadigingsgraad van de damp.

In vergelijking met andere technieken vindt de verbranding plaats bij hoge temperatuur vanwege de compressieslag. De hoge temperatuur zorgt voor een relatief hoge NO_x-uitstoot. Als de gasmotor niet goed is afgesteld kan de uitstoot van onverbrande, deel geoxideerde van VOS en koolmonoxide (CO) aanzienlijk hoger worden.

De gebruikelijke gasmotoren met vonkontsteking zijn uitgerust met een driewegkatalysator waarmee de uitstoot van onverbrande koolwaterstoffen (C_xH_y), koolmonoxide (CO) en stikstofoxiden (NO_x) wordt verlaagd. Een verdere verlaging van onverbrande koolwaterstoffen en koolmonoxide is mogelijk met katalytische oxidatie. Dit kan belang zijn om de lage emissiegrenswaarde te kunnen garanderen in producten met een hoog benzeengehalte.

De gebruikelijke dual-fuelmotoren met compressieontsteking zijn uitgerust met katalytische oxidatie (DOC) waarmee de uitstoot van onverbrande koolwaterstoffen (C_xH_y) en koolmonoxide (CO) wordt verlaagd. De uitstoot van stikstofoxiden (NO_x) wordt beperkt met selectieve katalytische reductie (SCR) en een ureumoplossing ('AdBlue'⁶⁵), eventueel aangevuld met een ammoniakkatalysator (ASC) om ammoniakslip te voorkomen. Om de uitstoot van roetdeeltjes te beperken is een roetfilter (DPF) gebruikelijk.

⁶⁴ Ordegrootte 20% van het vermogen (mondelinge communicatie van leverancier)

⁶⁵ AdBlue is de gedeponeerde handelsnaam voor AUS32, een 32,5%-oplossing van ureum in gedemineraliseerd water

Tabel 4.13 – Toepassing van een gasmotor als dampverwerking bij ontgassen

Aspect	Beschouwing
Producten	Geschikt voor alle niet-gehalogeneerde producten
Dampaanbod	<ul style="list-style-type: none"> • Flexibel in debietwisselingen in combinatie met steunbrandstof • In de praktijk kan een gasmotor met vonkontsteking gevoelig zijn voor storingen bij wisselende belastingen.
Afmetingen	Geschikt voor mobiele toepassing
Investeringskosten	750.000 €
Operationele kosten	Steunbrandstof
Betrouwbaarheid	Geen bijzonderheden anders dan dat het motorregeling aan hoge eisen moet voldoen om de wisselingen in dampconcentratie snel te kunnen opvangen
Validatie	<p>Gasmotoren met vonkontsteking worden al lange tijd, zij het in beperkte mate, toegepast bij vaste installaties voor overslag van vluchtige producten.</p> <p>Dual-fuelmotoren zijn gangbaar in bijvoorbeeld de olie- en gasindustrie waarbij aardgas naast gasolie (diesel) als brandstof worden gebruikt in een motor met compressieontsteking. De toepassing voor het behandelen van damp van het ontgassen van ladingtanks zit nog in de testfase.</p>
Energie	<p>Gasmotor met vonkontsteking: steunbrandstof bij lage verbrandingswaarde van de damp;</p> <p>Dual-fuelmotor: diesel ongeacht de verbrandingswaarde van de damp</p>
Productterugwinning	Niet mogelijk
Nuttig gebruik van de energie	Elektriciteit mits levering aan het net of opslag in een batterij mogelijk zijn
Verbruik	Niet van toepassing
Afvalwater, afval, luchtverontreiniging	Luchtverontreiniging door de rookgassen

4.8.6.2 Proefneming met ontgassen

Dampverwerking van ontgassing met een gasmotor met vonkontsteking is onderzocht in de proefnemingen van 2020 [Taskforce 2021]. De uitstoot naar de lucht van de dampbehandelingstechniek is weergegeven in de volgende tabel. Er was daarbij geen sprake van opwekking van elektriciteit.

Tabel 4.14 – Uitstoot naar de lucht van de dampbehandelingstechniek (gasmotor)

Referentie	Voorgaande lading	Rookgas			
		VOS [mg/Nm ³]	Benzeen [mg/Nm ³]	NOx [mg/Nm ³] 3% O ₂	CO [mg/Nm ³]
Algemene grenswaarde*		50	1	100	n.v.t.
B	Pygas	25,8	1	682	n.b.
C	Nafta	20,5	0,9	2.074	n.b.
D	Pygas	26,4	17	1.535	n.b.
E	Benzine	n.b.	n.b.	1.400	400
F	Pygas	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.

n.b.: niet bekend; n.v.t.: niet van toepassing

** Bal artikel 5.30*

De volgende conclusies kunnen worden getrokken:

- VOS: voldoet aan de emissiegrenswaarde
- Benzeen
 - In twee van de drie metingen voldoet aan de emissiegrenswaarde
 - In één meting met vermoedelijk een aanzienlijk benzeengehalte wordt de emissiegrenswaarde overschreden
- NOx: voldoet niet aan de emissiegrenswaarde voor een gasmotor

In vergelijking met de emissiegrenswaarden voor VOS (50 mg/Nm³) en voor NOx (100 mg/Nm³) valt op dat de gemeten VOS-concentratie laag is en de NOx-concentratie hoog is. Dit kan er op wijzen dat de gasmotor hierop ingesteld is. Met een SCR als nageschakelde techniek zou het mogelijk moeten zijn om bij die instelling ook te voldoen aan de NOx-emissiegrenswaarde. Dit zal middels proefnemingen moeten worden aangetoond.

Nuttig gebruik van de energie

In vaste installatie is het gebruikelijk om de gasmotor te gebruiken om een elektriciteitsgenerator aan te drijven en zo elektriciteit op te wekken. Indien er een walstroomaansluiting aan de kade beschikbaar is zou theoretisch ook elektrische stroom aan het net kunnen worden geleverd. Een andere mogelijke nuttige toepassing van een gasmotor zou kunnen zijn dat een binnenvaarttanker tijdens de vaart de benzinedamp 'voor-ontgast' middels een gasmotor met generator en de opgewekte elektriciteit nuttig gebruikt om te voorzien in de eigen elektriciteitsbehoefte of aandrijving. Deze mogelijkheden vallen buiten het bestek van het onderzoek en zijn niet nader beschouwd.

Verwachte ontwikkelingen

De opgewekte elektriciteit kan worden opgeslagen in batterijen ter grootte van een standaard container, containerbatterij genoemd. Het voordeel van de batterij is dat de opgewekte elektriciteit elders volgens behoefte aan een gebruiker of het net kan worden geleverd. In de praktijk worden containerbatterijen niet toegepast voor dampverwerking van ontgassing gelet op de hoge kosten.

De 'dual-fuelmotor' leent zich bij uitstek⁶⁶ voor dampverwerking tijdens het varen, wat aanzienlijke tijdswinst oplevert ten opzichte van dampverwerking aan de wal. De motor kan bijvoorbeeld, gekoppeld aan een generator, voorzien in de benodigde elektriciteit of bijdragen aan de aandrijving van het schip. De bestaande wetgeving (ADN) staat dampverwerking tijdens het varen niet toe en vergt strikte scheiding van lading en 'binnenzone'.

4.9 Technieken voor andere productgroepen

De stoffen⁶⁷ van fase III vormen geen onderdeel van het onderzoek maar voor deze groep zal in de toekomst eveneens een zelfde ontgassingsverbod gelden. De behandelde technieken voor de stoffen van fase I en II zijn in beginsel ook geschikt voor deze stoffen. Wel zijn er verschillen in vluchtigheid en het benzeen/ZZS-gehalte. Zo zal bijvoorbeeld voor ethanol voor een 'minder lage' temperatuur vereist zijn een zelfde terugwinningsrendement als voor benzine (zie paragraaf 4.3).

Mobiele verbrandingstechnieken lenen zich niet goed voor het behandelen van gehalogeneerde koolwaterstoffen⁶⁸ in tegenstelling tot bijvoorbeeld cryocondensatie aangevuld met adsorptie.

⁶⁶ Theoretisch is dit ook mogelijk met een gasmotor op propaan, LPG of benzine maar dit vergt een afzonderlijke opslag van deze brandstoffen op het schip wat veiligheidsrisico's met zich meebrengt.

⁶⁷ Aceton, cyclohexaan, ethanol, ethyl-tert-butylether (ETBE), iso-octenen, methanol, ruwe aardolie (met minder dan 10% benzeen), ontvlambare vloeistof, N.E.G., met minder dan 10% benzeen, methyl-tert-butylether (MTBE), koolwaterstoffen, vloeibaar, N.E.G., met minder dan 10% benzeen

⁶⁸ Bijvoorbeeld 1,2-dichloorbenzeen, 1,1-dichloorethaan, 1,2-dichloorethaan (EDC), methylchloride, trichlooretheen (Tri), tetrachloor-methaan (Tetra), chloroform

5 Aanvullende beoordeling van de technieken

5.1 Toelichting

Aansluitend op hoofdstuk 4 waar geschikte technieken zijn beschreven en de BBT is onderzocht door vergelijking van de emissie van de techniek met de emissiegrenswaarde, worden in dit hoofdstuk 5 de technieken onderling verder vergeleken en nader beoordeeld. Dit hoofdstuk kan door het bevoegd gezag gebruikt worden als aanvullende informatie als er een maatwerk vergunning wordt verleend. Voor de productgroepen is per geselecteerde techniek de volgende informatie inzichtelijk gemaakt:

- Technieken met rendement, restconcentratie en kosten
- Neveneffecten

5.2 Beoordelingswijze

In het vorige hoofdstuk is aangegeven dat alle technieken aan de algemene emissie-eisen van het Bal kunnen voldoen, onder de aanname dat dit voor een gasmotor voorzien van passende nageschakelde technieken nog moet worden gedemonstreerd, met name voor producten met hoge benzeengehaltes, evenals voor een eenvoudige naverbrander (VCU). Om tussen de technieken die voldoen aan de algemene emissie-eisen op grond van milieutechnische overwegingen een keuze te kunnen maken is gebruik gemaakt van een integrale milieuafweging met behulp van milieuprijzen. De uiteindelijke afweging welke techniek als beste beschikbare techniek wordt beschouwd zal van geval tot geval kunnen verschillen en is een zaak van het bevoegd gezag. Daarbij zal rekening worden gehouden met de geografische ligging, de plaatselijke milieuomstandigheden en de resultaten van een integrale afweging van milieueffecten. In dit hoofdstuk wordt ingegaan op dit laatste aspect voor standaard situaties.

Het Bal biedt een referentiekader voor een dergelijke techniekvergelijking⁶⁹ met als beoordelingscriteria: rendement, validatie, bedrijfszekerheid, kosten en neveneffecten. De kosten zijn beschouwd volgens de methode van bijlage XXX van de Omgevingsregeling met onder andere de investering, afschrijving en operationele kosten. De neveneffecten zijn zowel kwalitatief als kwantitatief beschouwd met onderlinge vergelijking van de technieken op basis van milieuschadeprijzen.

5.2.1 Beoordeling van de technische aspecten en kosten

Hierna is toegelicht hoe deze begrippen zijn gebruikt in dit rapport.

Rendement

Zoals eerder aangegeven wordt de effectiviteit van het ontgassen bepaald door de ventilatie in de producttanks en niet door de dampverwerkingstechniek. Het beschouwde rendement is dus niet betrokken op de concentratie in de producttank maar op de verwijderde hoeveelheid damp.

Het rendement is gebruikt in twee betekenissen, namelijk:

⁶⁹ Artikel 5.23 van het Bal

Kenmerk R001-1292542RAX-V05

- Absolute en relatieve hoeveelheid damp die door systeem wordt afgevangen
- Restconcentratie vergeleken met de emissiegrenswaarde [mg/Nm^3]

Validatie en bedrijfszekerheid

Bij de beschouwing over validatie is aangegeven of de techniek als een bewezen techniek kan worden aangemerkt, gelet op toepassing bij ontgassing en tankopslagbedrijven. Bij bedrijfszekerheid is de gevoeligheid voor storingen beschouwd.

Kosten

De investeringskosten van de beschouwde maatregelen zijn overgenomen uit de Factsheets emissiebeperkende technieken. Daarnaast is nog rekening gehouden met aanvullende kosten die gepaard gaan met de investering (eveneens gebaseerd op de voorgenoemde factsheets). De operationele kosten zijn geschat.

Kosteneffectiviteit

De kosteneffectiviteit moet worden berekend volgens bijlage XXX *Berekening kosteneffectiviteit* van de Omgevingsregeling⁷⁰ met een rentevoet van 5%. Voor VOS is het afwegingsgebied wettelijk vastgesteld in bijlage XXX bij de artikelen 4.14b en 9.7 van de Omgevingsregeling, namelijk 8 – 15 € per vermeden kg.

5.2.2 Integrale milieuafweging

Hierna is toegelicht hoe de neveneffecten van de techniek zijn beschouwd.

Kwalitatief

De volgende directe en indirecte effecten zijn kwalitatief beschouwd:

- Gevaarlijk afval
- Circulaire economie, grondstoffengebruik

Kwantitatief

De lucht gerelateerde milieueffecten op bijvoorbeeld volksgezondheid, natuur en klimaat kunnen niet alleen kwalitatief maar ook kwantitatief worden vergeleken door gebruik te maken van milieuschadecosten. De milieukosten zijn berekend aan de hand van de milieuprijzen [CE Delft 2023] zoals in de bijlage aangegeven. Deze methode is robuust voor de gangbare luchtverontreinigende stoffen waarvoor uitgebreid onderzoek beschikbaar is naar de effecten op volksgezondheid en het milieu; stoffen zoals VOS, NO_x, CO en benzeen, welke zijn beschouwd. Volgens de huidige inzichten wordt schade van luchtverontreiniging op volksgezondheid en milieu vooral veroorzaakt door de uitstoot van fijn stof, NO_x en VOS. Van alle zeer zorgwekkende stoffen is benzeen de stof die het meeste voorkomt in de producten van lijst I en lijst II en de damp hiervan. Benzeen evenals andere ZZS in de damp van deze producten zijn niet geclassificeerd als persistent of bioaccumulerend.

⁷⁰ Verwacht wordt dat de Omgevingswet op 1 januari 2024 in werking zal treden. Tot die tijd geldt Bijlage 2 van het Activiteitenbesluit (annuïteitsfactor voor elektromechanische investeringen bedraagt 0,163; voor bouwkundige investeringen 0,110)

Het kwantificeren aan de hand van milieuprijzen geeft een algemeen beeld. Specifieke situaties kunnen daarvan afwijken. Bijvoorbeeld door het gebruik van 'groene' propaan, stikstof of stroom is het neveneffect op de opwarming van de aarde kleiner en zijn de milieuschadetekosten lager.

5.3 Behandelen van benzinedamp

5.3.1 Rendement, validatie en bedrijfszekerheid

Zoals eerder aangegeven wordt de effectiviteit van het ontgassen bepaald door de ventilatie in de producttanks en niet door de dampverwerkingstechniek. Het beschouwde rendement is dus niet betrokken op de concentratie in de producttank maar op de verwijderde hoeveelheid damp.

De praktijkproeven met het verwerken van benzinedampen leidt tot het volgende beeld ten aanzien van validatie en bedrijfszekerheid:

- Condensatie met adsorptie: condensatie werkt op zich goed maar ijsvorming kan tot tijdelijke storingen leiden die de ontgassingsduur verlengen; beschouwd als bewezen techniek
- Eenvoudige naverbrander (VCU): verbranden verliep zonder storingen; beschouwd als robuuste, bewezen techniek
- Gasmotor: verbranden werkt op zich goed maar is gevoelig voor storingen in de regeling met de toevoer van de hulpbrandstof propaan; beschouwd als bewezen techniek maar zijn niet efficiënt genoeg voor het volledig oxideren van benzeen
- RTO: verbranden werkt op zich goed maar is gevoelig voor schommelingen in stookwaarde van de aangezogen damp en storingen in de regeling met de toevoer van de verbrandingslucht en de hulpbrandstof propaan; beschouwd als bewezen techniek

De effectiviteit en kostenraming van de maatregelen zijn in de volgende tabel samengevat. De details van de berekening zijn in de bijlage verstrekt. Om de vergelijking te kunnen maken is het volgende verondersteld:

- Ontgassen van 100 schepen met ladingtanks van 5.000 m³ per schip
- Terugwinnen van 99% van de damp middels condensatie
- Marktwaarde voor het benzinedampcondensaat ter illustratie: 0,2 EUR/kg
- Rentevoet: 5% per jaar
- Afschrijvingstermijn: 10 jaar
- Onderhoud en bediening: 5% van de investering
- Afzet voor opgewerkte elektriciteit
- De kosten voor gebruik van de kade en de lokale nutsvoorzieningen zijn niet beschouwd

Tabel 5.1 – Emissiereductie en kosten van de maatregelen (afgerond op duizendtal)

Parameter	Condensatie met adsorptie	VCU	FTO	Gasmotor*	RTO
Verwijderde VOS (kg/jaar)	439.000	438.000	438.000	411.000	437.000
Teruggewonnen VOS (kg/jaar)	438.000	0	0	0	0
Investering (€)	900.000	500.000	1.000.000	763.000	1.500.000
Afschrijving (€/jaar)	117.000	65.000	130.000	99.000	194.000
Vaste operationele kosten (€/jaar)	45.000	25.000	50.000	38.000	75.000
Variabele kosten (€/jaar)	1.466.000	35.000	21.000	45.000	21.000
Opbrengsten (€/jaar)	88.000	0	0	152.000	0
Kosteneffectiviteit (€/kg)	3,5	0,3	0,5	0,1	0,7

* Toepassing van gasmotor zonder nabehandeling wordt op grond van de uitgevoerde testen en kenmerken van de techniek niet beschouwd als BBT. Voor gasmotoren met nabehandeling moet dit nog worden aangetoond.

Bovenstaande vergelijking maakt duidelijk dat de jaarlijkse kosten in hoofdzaak worden bepaald door het verbruik (energie en grondstoffen) en in mindere mate door de vaste kosten van de installatie (afschrijving, bediening en onderhoud). De netto kosten van een gasmotor hangen sterk af of de opgewerkte elektriciteit kan worden geleverd aan het net of anderszins nuttig aangewend.

Dit betekent dat de beschouwde technieken voor dampverwerking van het ontgassen binnenvaart-tankers als kosteneffectief wordt gezien volgens de Omgevingsregeling, bijlage XXX omdat de berekende waarden lager zijn dan de onderkant van het afwegingsgebied voor VOS (8 – 15 EUR/kg). In combinatie met de conclusies van hoofdstuk vier illustreert dit dat de meeste technieken BBT zijn.

5.3.2 Neveneffecten

De milieuschade is de combinatie van de schadelijkheid van een stof met de uitstoot van die stof. De kenmerkende milieuschadecosten voor de dampbehandeling van het ontgassen van een binnenvaarttanker met benzine als voorlading zijn in de volgende tabel aangegeven voor verschillende opties voor nageschakelde technieken. Niet-onderscheidende aspecten zijn niet vermeld, bijvoorbeeld het elektriciteitsverbruik van de ventilator voor het aanzuigen van de damp. Bouw materiaal is evenmin beschouwd. De berekeningswijze is toegelicht in de bijlage.

Tabel 5.2 – Milieuschadekosten van dampbehandeling van tankontgassing (5.000 m³ en benzine als vorige lading)

Parameter	Condensatie + adsorptie	VCU	FTO	Gasmotor	RTO
Milieukosten voor energie[€]					
• Propan/diesel	n.v.t.	21	13	21	13
• Elektriciteit	2	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Milieukosten door afgas [€]					
• Benzeen	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0
• CO	n.v.t.	0,1	0,1	9,6	0,3
• CO ₂	n.v.t.	1.929	1.860	1.860	1.860
• NOx	n.v.t.	201	35	211	70
• NMVOS	0,5	9	9	275	18
• NH ₃				50	
Overige milieukosten [€]					
Vloeibaar maken van stikstof ⁷¹	259	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Winning, productie en reactivatie van actiefkool *	121	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Totaal van milieuschadekosten [€]	381	2.160	1.917	2.427	1.961
Milieubaten					
• Vermijden VOS-uitstoot	12.029	12.059	12.059	11.792	12.050
• Opbrengst van condensaat**	1.752	nvt	nvt	Nvt	nvt
• Geleverde elektriciteit	nvt	nvt	nvt	370	nvt
Netto milieubaten	+13.404	+9.860	+10.103	+9.697	+10.049

* Alleen het broeikas effect en NOx zijn beschouwd; de uitstoot van giftige stoffen zoals PAK of afvalwater tijdens de productie van actiefkool is niet beschouwd, evenmin als het afvalstadium

** Als extractiekosten van fossiele brandstoffen (ruwe aardolie)

De voorgaande tabel laat duidelijk zien dat de milieubaten door het behandelen van benzinedamp van het ontgassen aanzienlijk groter zijn dan de milieuschade. Daarnaast zijn de milieuschadecosten van damperugwinning beduidend kleiner dan die van de verbrandingstechnieken. Dit wordt vooral veroorzaakt door de oxidatie van de koolwaterstoffen in de damp waarbij kooldioxide ontstaat en in mindere mate door de vorming van stikstofoxiden (NOx).

5.3.3 Samenvattend overzicht en weging van technieken

Met alle beschouwde technieken is het, op basis van geraadpleegde literatuur en onderzoeken, mogelijk de VOS in de ontgaste damp effectief te verwerken en te voldoen aan de wettelijke emissie-eisen met de kanttekening dat een gasmotor moet voorzien zijn van nageschakelde technieken. In die zin is er geen verschil tussen de technieken. De verschillen tussen de technieken zijn in de volgende tabel kwalitatief vergeleken. De gehanteerde waardering is bedoeld voor onderlinge vergelijking.

⁷¹ Gebaseerd op proefneming: 21.084 kg vloeibaar stikstof (N₂) voor ca. 8.991 m³ in producttanks

Tabel 5.3 – Vergelijking van mobiele behandelingstechnieken voor ontgassing van binnenvaarttankers met benzine-damp

Parameter	Condensatie met adsorptie	VCU	FTO	Gasmotor**	RTO
Effectiviteit	++	++	++	-	++
Validatie	+	++	+	+	+
Bedrijfszekerheid	0	++	+	+	+
Kosten	---	--	-	-	--
Neveneffecten*	+	-	-	--	-

* Los van de milieubaten door het vermijden van de VOS-uitstoot

Toelichting

- Effectiviteit: alle technieken zijn effectief in het verwijderen van VOS uit de productdamp waarbij de restconcentratie VOS in de rookgassen van een gasmotor hoger is; bij een RTO moet worden opgemerkt dat deze techniek minder geschikt is voor het behandelen van verzadigde damp door de lange behandelingstijd die samenhangt met de noodzakelijke verdunning
- Validatie: Vooral VCU wordt algemeen toegepast en is een uitgerijpte techniek voor het mobiel behandelen van benzinedampen bij ontgassing van schepen; de overige technieken zijn minder algemeen voor het mobiel behandelen maar zijn voor andere toepassingen wel bewezen technieken
- Bedrijfszekerheid: de proefnemingen laten zien dat een VCU is de meest robuuste techniek is en dat condensatietechniek nog niet geheel probleemloos is in de uitvoering
- Kosten: een VCU en gasmotor zijn de minst dure dampverwerkingstechnieken, waarbij bij een gasmotor nog uitmaakt of opgewekte elektriciteit ten gelde kan worden gemaakt; FTO en RTO zijn aanzienlijk (factor 1,5 – 2) duurder en condensatie minstens een factor 5 duurder is
- Neveneffecten: condensatie is de enige techniek waarbij de milieubaten groter zijn de milieuschadetekosten; de milieuschadetekosten van de verbrandingstechnieken zijn aanzienlijk (ca. 20%) in vergelijking met de milieubaten waarbij de milieuschadetekosten van een gasmotor het hoogst zijn, ook als de opgewekte elektriciteit nuttig kan worden gebruikt

5.4 Behandelen van benzeendamp

5.4.1 Rendement, validatie en bedrijfszekerheid

Het behandelen van benzeendamp is vergelijkbaar met het behandelen van benzinedamp. Het belangrijkste verschil is dat de vereiste eindconcentratie na behandeling moet voldoen aan de algemene emissiegrenswaarde van 1 mg/Nm³, wat een factor 50 strenger is dan die voor benzinedamp. Deze lage concentratie kan inhouden dat technieken zoals een eenvoudige naverbrander (VCU) en gasmotor moeten worden uitgerust met een nageschakelde techniek zoals katalytische oxidatie.

Aangenomen is dat de installatie die voor benzeendamp van het mobiel ontgassen van binnenvaarttankers wordt ingezet ook wordt gebruikt voor benzinedamp. Het volume benzine dat naar verwachting mobiel zal worden ontgast is vele malen groter dan het volume benzeen. De kosteneffectiviteit van de dampbehandelingsinstallatie zullen in hoofdzaak worden bepaald door de

hoeveelheid behandelde benzinedamp zodat er geen afzonderlijke kosteneffectiviteitsberekening voor benzeen nodig is.

5.4.2 Neveneffecten

De kenmerkende milieukosten en -baten voor de dampbehandeling van het ontgassen van een binnenvaarttanker met benzeen als voorlading zijn in de volgende tabel aangegeven voor verschillende opties voor nageschakelde technieken.

Tabel 5.4 – Milieuschadeprijzen van dampbehandeling van tankontgassing (3.500 m³ en benzeen als vorige lading)

Parameter	Condensatie + adsorptie	VCU	FTO	Gasmotor	RTO
Milieukosten voor energie[€]					
• Propaan/diesel	n.v.t.	31	9	31	9
• Elektriciteit	1	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Milieukosten door afgas[€]					
• Benzeen	0,00	0,01	0,01	0,03	0,01
• CO	n.v.t.	0,1	0,1	3,9	0,1
• CO ₂	n.v.t.	808	708	708	708
• NO _x	n.v.t.	79	54	20	28
• NMVOS	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	0,1
• NH ₃				31	
Overige milieuschadeprijzen [€]					
Vloeibaar maken van stikstof ⁷²	109	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Winning, productie en reactivatie van actiefkool *	86	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Totaal van milieuschadeprijzen [€]	196	918	730	845	744
Milieubaten					
• Vermijden benzeenuitstoot	565	565	565	565	565
• Opbrengst van condensaat**	612	nvt	nvt	nvt	nvt
• Nuttig gebruik van elektriciteit	Nvt	nvt	nvt	127	nvt
Netto milieubaten	+981	-353	-166	-153	-180

* Alleen het broeikaseffect en NO_x zijn beschouwd; de uitstoot van giftige stoffen zoals PAK of afvalwater tijdens de productie van actiefkool is niet beschouwd, evenmin als het afvalstadium

** Als extractiekosten van fossiele brandstoffen (ruwe aardolie)

De voorgaande tabel laat zien dat alleen met benzeendamptherugwinning de milieubaten groter zijn dan de milieuschade. Elke vorm van thermische oxidatie leidt tot netto milieuschade, doordat de vernietigde benzeendamp minder schadelijk⁷³ is dan de gemiddeld VOS. Het kan bevreesdheid opwekken dat benzeen, als ZZS geclassificeerd, een lage milieuprijs heeft. De ZZS-classificatie geeft alleen aan dat een stof een zeer zorgwekkende eigenschap heeft maar is geen indicatie van

⁷² Gebaseerd op proefneming: 21.084 kg vloeibaar stikstof (N₂) voor ca. 8.991 m³ in producttanks

⁷³ De milieuprijs van benzeen bedraagt 0,366 euro/kg, terwijl de milieuschadeprijs van niet-methaan VOS 2,73 euro/kg bedraagt (centrale waarde; [CE Delft, 2023]), waarschijnlijk vanwege het lagere ozonvormend vermogen (smog)

de zorgwekkendheid. Zie bijvoorbeeld ter vergelijking, de milieuprijs van de volgende twee ZZS, 0,08 €/kg voor CO versus 5.704 €/kg voor benzo(a)pyreen.

5.5 Behandelen van ethanoldamp

5.5.1 Rendement, validatie en bedrijfszekerheid

Het behandelen van ethanoldamp is vergelijkbaar met het behandelen van benzinedamp. Aangenomen is dat de installatie die voor benzeendamp van het mobiel ontgassen van binnenvaarttankers wordt ingezet ook wordt gebruikt voor benzinedamp. Het volume benzine dat naar verwachting mobiel zal worden ontgast is vele malen groter dan het volume ethanol. De kosteneffectiviteit van de dampbehandelingsinstallatie zullen in hoofdzaak worden bepaald door de hoeveelheid behandelde benzinedamp zodat er geen afzonderlijke kosteneffectiviteitsberekening voor ethanol nodig is.

5.5.2 Neveneffecten

De kenmerkende milieukosten en -baten voor de dampbehandeling van het ontgassen van een binnenvaarttanker met ethanol als voorlading zijn in de volgende tabel aangegeven voor verschillende opties voor nageschakelde technieken.

Tabel 5.5 – Milieuschadekosten van dampbehandeling van tankontgassing (3.500 m³ en ethanol als vorige lading)

Parameter	Condensatie + adsorptie	VCU	FTO	Gasmotor	RTO
Milieukosten voor energie[€]					
• Propan/diesel	n.v.t.	33	10	33	10
• Elektriciteit	1	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Milieukosten door afgas[€]					
• Ethanol	0,00	0,1	0,1	4	0,1
• CO	n.v.t.	0,0	0,0	1,3	0,0
• CO ₂	n.v.t.	211	105	105	105
• NOx	n.v.t.	28	5	29	10
• NMVOS	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	1,3
• NH ₃				7	
Overige milieuschadekosten [€]					
Vloeibaar maken van stikstof ⁷⁴	95	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Winning, productie en reactivatie van actiefkool *	38	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
Totaal van milieuschadekosten [€]	134	272	120	178	126
Milieubaten					
• Vermeden ethanoluitstoot	77	83	83	79	83
• Opbrengst van condensaat**	111	nvt	nvt	Nvt	Nvt
• Nuttig gebruik van elektriciteit	Nvt	nvt	nvt	22	Nvt
Netto milieubaten	55	-195	-43	-83	-49

* Alleen het broeikaseffect en NOx zijn beschouwd; de uitstoot van toxische stoffen zoals PAK of afvalwater tijdens de productie van actiefkool is niet beschouwd, evenmin als het afvalstadium

** Als extractiekosten van fossiele brandstoffen (ruwe aardolie)

*** De CO₂-uitstoot wordt in hoge mate (> 95%) wordt bepaald door koolstof in de VOS-damp; het brandstofverbruik is daarbij van ondergeschikt belang voor de totale CO₂-uitstoot van de verbrandingstechniek

De voorgaande tabel laat zien dat alleen met ethanoldamptewinning de milieubaten groter zijn dan de milieuschade. Elke vorm van thermische oxidatie leidt tot netto milieuschade doordat de vernietigde ethanoldamp minder schadelijk⁷⁵ is dan de gemiddeld VOS.

⁷⁴ Gebaseerd op proefneming: 21.084 kg vloeibaar stikstof (N₂) voor ca. 8.991 m³ in producttanks

⁷⁵ De milieuprijs van ethanol bedraagt 0,271 euro/kg, terwijl de milieuschadeprijs van niet-methaan VOS 2,73 euro/kg bedraagt (centrale waarde; [CE Delft, 2023]), waarschijnlijk vanwege het lagere ozonvormend vermogen (smog)

6 Monitoring

6.1 Toelichting

Dit hoofdstuk gaat in op de meetmethode om de concentratie in het afgas te meten en te kunnen toetsen aan de wettelijke emissiegrenswaarden. Daar moet onderscheid gemaakt worden gemaakt tussen drie verschillende wettelijke kaders:

- CDNI: damp in de ladingtanks
- Europese Benzinerichtlijn⁷⁶ ~ : damperugwinning
- Nederlandse luchtvoorschriften: Bal, hoofdstuk 5: afgas van dampbehandelingsinstallatie

6.2 Ladingtanks

In het besluit CDNI 2017-I-4 aanhangsel IIIa worden de voorwaarden gesteld voor het bepalen van de dampconcentratie om te verifiëren of de damp vrij kan worden geventileerd naar de lucht. De betreffende voorwaarden voor meting van de dampconcentratie zijn:

- Methoden, meettechnieken en meetapparatuur volgens ADN⁷⁷
- Meetpunt:
 - representatief punt in de leiding die loopt van de ladingtank naar de ontvangstinrichting voor dampen *of*
 - punten in de ladingtank die door de deskundige als geëigend worden beschouwd
- Deskundige moet voldaan de eisen die daaraan worden gesteld in ADN (ADN certificaat)
- Meting bij standaardomstandigheden
- Tweede meting na 30 minuten
- Gasdetectiemeter moet voldoen aan ADN (paragraaf 1.2)

De deskundige volgens het ADN is iemand die in zijn ADN-opleiding scholing en training gehad heeft om een gasmeting te kunnen, en mogen, uitvoeren. In de praktijk is dat de gezagvoerder van het tankschip. Daarnaast is er een expert⁷⁸ die van overheidswege een zogenaamde gasvrij-certificaat mag uitschrijven, voor bijvoorbeeld een werfbezoek.

De gebruikelijke meetmethode voor vaste gasdetectie van vluchtige organische stoffen op schepen is gebaseerd op infraroodabsorptie. Voor individuele stoffen zijn ook elektrochemische meetprincipes beschikbaar. Dezelfde meetprincipes kunnen worden toegepast in de leiding van de ladingtank naar de ontvangstinrichting. Aanbevolen wordt om een meetprotocol te ontwikkelen rekening houdende met de volgende aspecten:

- Representatief punt om de dampconcentratie naar de ontvangstinrichting te bepalen
- Meetduur
- Verificatie per ladingtank in het geval van het gelijktijdig ontgassen van meerdere ladingtanks.
- Heterogeniteit van ladingtanks door luchtpockets of plassen
- Vastlegging van resultaten en goedkeuring in een verslag

⁷⁶ Richtlijn 94/63/EG van 20 december 1994

⁷⁷ Europese overeenkomst voor het internationale vervoer van gevaarlijke goederen over de binnenwateren (ADN) Bijlage, 2021

⁷⁸ Ook gasdokter genoemd

6.3 Dampsterugwinning

De monitoringsregels voor benzineterminals zijn gegeven in het Bal, paragraaf § 4.105. De emissiegrenswaarde in de afvoer van dampsterugwinningsinstallatie *of een -verbrandingsinstallatie* van een benzineterminal is 150 mg/Nm³ als uurgemiddelde⁷⁹ (Bal, artikel 4.1082) waarbij tenminste zeven uur met een normaal debiet moet worden gemeten (Bal, artikel 4.1085). De emissiegrenswaarde geldt voor benzinedamp wat in de Benzinerichtlijn nader is bepaald als ‘*gasvormige uit benzine vervluchtigende verbinding*’. Dit betekent dat het gaat om totaal koolwaterstoffen inclusief methaan. In andere artikelen worden ‘vluchtige organische stoffen’, uitgedrukt in totaal organische koolstof bepaald met vlamionisatie (FID) volgens⁸⁰ NEN-EN 12619 . In analogie, kunnen deze norm en definitie ook hier worden gehanteerd voor alle dampbehandelingstechnieken met dampsterugwinning, ongeacht het product.

In artikel 4.1084 tot en met 4.1087 van het Bal zijn regels opgenomen over de nauwkeurigheid, meetonzekerheid en meetplicht.

6.4 Dampbehandeling

Indien er geen sprake is van dampsterugwinning ligt het voor de hand aan te sluiten bij de algemene monitoringsregels van het Bal volgens artikel 5.30 en de daarop volgende artikelen. De meetmethoden voor de algemene emissie-eisen zijn aangegeven in artikel 5.31 van het Bal. De volgende tabel geeft een overzicht van de aangewezen meetmethoden voor zover relevant voor dampbehandeling.

Tabel 6.1 – Voorgescreven meetmethoden voor dampbehandeling

Parameter	Meetmethode	Meetprincipe
Monsternamen		
• Algemene aspecten ⁸¹	NEN-EN 15259	
• Meetvlakbeoordeling	NEN-EN 15259	
• Monstergasconditionering	NEN-ISO 10396	
• Laboratorium (parallelmeting): accreditatie	NEN-EN-ISO/IEC17025	
Verontreinigende stoffen		
• Koolmonoxide (CO)	NEN-EN 15058	Niet-dispersieve infraroodspectrometrie
• Individuele vluchtige koolwaterstoffen	NPR-CEN/TS 13649	Adsorptie, desorptie en analyse met gaschromatografie
• Totaal koolwaterstoffen (CxHy – als C)	NEN-EN 12619	Vlamionisatie
• Methaan (CH ₄)	NEN-EN-ISO 25140	Vlamionisatie met scheiding

⁷⁹ Gelet op de gebruikelijke bepalingmethode (FID) is aangenomen dat de emissiegrenswaarde betrekking heeft op C

⁸⁰ Emissies van stationaire bronnen - Bepaling van de massaconcentratie van totaal gasvormig organisch koolstof in lage concentraties in verbrandingsgassen - Continue methode met vlamionisatiedetector

⁸¹ Air quality - Measurement of stationary source emissions - Requirements for measurement sections and sites and for the measurement objective, plan and report

Kenmerk R001-1292542RAX-V05

Parameter	Meetmethode	Meetprincipe
<ul style="list-style-type: none"> Zoutzuur (HCl) 	NEN-EN 1911	Absorptie en analyse met spectrofotometrie ⁸²
<ul style="list-style-type: none"> Stikstofoxiden (NO_x als NO₂) 	NEN-EN 14792	Chemoluminescentie
Overige parameters		
<ul style="list-style-type: none"> Debiet 	NEN-EN-ISO 16911-1	Drukverschilmeting
<ul style="list-style-type: none"> Temperatuur 	ISO 8756	Thermokoppel
<ul style="list-style-type: none"> Vocht 	NEN-EN 14790	Gravimetrisch
<ul style="list-style-type: none"> Zuurstof (O₂) 	NEN-EN 14789	Paramagnetisme

De verdere bepalingen over het meten zoals monitoringsfrequentie en meetduur volgen uit het Bal (artikelen 5.32 tot 5.35, 5.37 en 5.38). Een gebruikelijk meetonderzoek bestaat uit metingen in drievoud gedurende 30 minuten per deelmeting. Een langere bemonsteringstijd kan voortvloeien uit de meetmethode of wijze van bemonsteren.

⁸² NEN-ISO 15923-1

7 Samenvatting, conclusies en aanbevelingen

7.1 Achtergrond

Vloeibare producten uit de aardolie- en chemische industrie worden in de binnenvaart in tankschepen vervoerd. Deze producten bestaan uit organische stoffen die bij kamertemperatuur verdampen, zogeheten vluchtige organische stoffen (VOS). Voordat tankschepen een product dat niet verenigbaar is met de vorige lading kunnen vervoeren moeten de resten en dampen van de vorige lading vaak verwijderd worden uit de producttanks van het schip. Daarvoor wordt lucht door de producttanks geblazen tijdens de vaart waarbij de dampen naar de buitenlucht worden uitgestoten. Dit wordt 'varend ontgassen' of ventileren genoemd. Er is een groot scala aan producten dat vervoerd wordt, maar de meerderheid van de vervoerde stoffen bestaat uit brandstoffen en nafta. Daarnaast worden ook specifieke chemische stoffen vervoerd, waaronder kankerverwekkende stoffen zoals benzeen.

Een verbod op varend ontgassen van een aantal productgroepen zal uiterlijk op 1 juli 2024 van kracht worden. De dampen van deze producten die vrijkomen uit de producttanks van binnenvaarttankers zullen dan moeten worden behandeld in dampverwerkingsinstallaties. Op de emissies van dampverwerkingsinstallaties zijn algemene regels van toepassing, waarvan het bevoegd gezag gemotiveerd kan afwijken. De toepassing van de beste beschikbare technieken (BBT) is daarbij van belang.

7.2 Probleemstelling en doel van het onderzoek

Voor de behandeling van dampen van ontgassende schepen kunnen vaste en mobiele installaties worden ingezet. Er bestond onduidelijkheid bij diverse belanghebbenden of mobiele dampverwerkingsinstallaties, anders dan dergelijke installaties bij tankopslagbedrijven en raffinaderijen, kunnen voldoen aan de emissie-eisen die in algemene regels zijn vastgelegd. Er is meer dan vijftig jaar kennis over dampverwerking in de industrie beschikbaar. De kennis over de beste beschikbare technieken bij ontgassingsinstallaties is op dit moment echter verbrokken bij meerdere partijen aanwezig.

Het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (IenW) heeft daarop besloten een inventarisatie te laten opstellen van installaties die kunnen worden ingezet voor het ontgassen van binnenvaarttankers op grond van de beschikbare literatuur, in afstemming met vertegenwoordigers van de betrokken belanghebbenden. Het doel van het onderzoek is belanghebbenden te voorzien van een overzicht van de huidige beschikbare technieken, waaronder de stuurgroep Varend Ontgassen. Tevens kan het bevoegd gezag dit overzicht betrekken in haar afwegingen bij vergunningverlening voor dampverwerkingsinstallaties.

Bij het opstellen van dit document is gebruik gemaakt van openbaar beschikbare bronnen door literatuuronderzoek. Daarnaast is aanvullende informatie verkregen van brancheverenigingen en vertegenwoordigers van belanghebbenden.

7.3 Afbakening

Deze studie is gericht op de dampen van de goederen vermeld in het CDNI Besluit 2017-I-4, aanhangsel IIIa, namelijk:

- Tabel I: benzine⁸³ of motorbrandstof, ethanol-benzinemengsels, 'niet elders genoemde' aardoliedestillaten (UN 1268) en benzeen
- Tabel II: stoffen die meer dan 10% benzeen bevatten

De toepasbaarheid van een techniek op een bepaalde locatie is afhankelijk van lokale omstandigheden zoals ruimte voor extra stikstofbelasting geluidsruimte of de mogelijkheid tot energie-hergebruik. Lokale milieuaspecten zijn niet specifiek beschouwd. De beschouwde technieken zijn beperkt tot technische maatregelen en bijbehorende monitoring. Overige vormen van technieken zoals organisatorische zijn niet beschouwd.

7.4 Wettelijke kader

Verschillende bepalingen zijn van belang voor dampbehandeling van het ontgassen van binnenvaarttanks. De belangrijkste bepalingen ten aanzien van emissie-eisen zijn als volgt opgenomen in de wetgeving (verwachte situatie op 1 juli 2024):

- Het verbod op ontgassing in het Scheepsafvalstoffenbesluit Rijn- en binnenvaart (SAB)
- Stoffen van het ontgassingsverbod: aanhangsel IIIa bij het CDNI-verdrag
- Algemene emissiegrenswaarde: Bal, paragraaf 5.4.4 Emissies in de lucht
- Emissiegrenswaarden voor gasmotor⁸⁴: Bal, paragraaf 4.126
- Monitoring van ontgassing: ADN
- Zorgplicht en ZZS-minimalisatie: Bal, artikel 2.11 en 5.4.3

Niet direct van toepassing op dampverwerking van ontgassing maar gelijkaardig van aard en techniek zijn:

- Eis tot dampterugwinning: Bal, paragraaf 4.105 Benzineterminal
- Emissiegrenswaarde voor benzinedampterugwinningsinstallatie: Bal, artikel 4.1082
- BBT-conclusies voor de behandeling van afgassen in de chemische industrie

Dit rapport geeft een beknopte samenvatting van de regelgeving. Het bevoegd gezag zal elke situatie afzonderlijk moeten beoordelen om passende emissie-eisen te stellen. Daarbij zal ook rekening moeten worden gehouden met de regelgeving inzake afvalverwerking.

Het is goed gedocumenteerd dat vaste dampverwerkers voor de behandeling van vluchtige organische stoffen aan de algemene emissie-eisen kunnen voldoen. Omdat er minder bekend is over mobiele installaties heeft het rapport zich op de inzet van mobiele installaties gericht.

⁸³ Benzinedamp: een gasvormige, uit benzine vervluchtigende verbinding; benzine: een aardoliederivaat, met of zonder additieven, met een volgens de Reidmethode bepaalde dampdruk van 27,6 kilopascal of meer, dat voor gebruik als brandstof voor motorvoertuigen is bestemd, met uitzondering van vloeibaar petroleumgas (LPG); Definitie volgens artikel 1 van de Benzinerichtlijn: Richtlijn 94/63/EG van 20 december 1994 betreffende de beheersing van de uitstoot van vluchtige organische stoffen (VOS) als gevolg van de opslag van benzine

⁸⁴ Die als autonome stookinstallatie worden geëxploiteerd; een stookinstallatie is een technische eenheid waarin brandstoffen worden geoxideerd om de warmte die zo wordt opgewekt te gebruiken

7.5 Dampverwerkingstechnieken

7.5.1 Geschikte technieken

Technieken die als BBT voor de mobiele dampbehandeling worden gezien voldoen aan de algemene emissiegrenswaarden en zijn commercieel beschikbaar voor het ontgassen van binnenvaarttanks. Daarbij gaat om bewezen betrouwbare technieken. Geschikte technieken voor mobiele dampverwerking van ontgassingsdamp zijn, al dan niet gecombineerd:

- Cryocondensatie met dampterugwinning
- Adsorptie zonder dampterugwinning
- Thermische oxidatie in een eenvoudige naverbrander (VCU)
- Vlamloze thermische oxidatie (FTO)
- Regeneratieve thermische oxidatie (RTO)

De thermische oxidatie in een gasmotor zonder nabehandelingstechnieken is geen BBT, want deze kan niet aan de toepasselijke emissie-eisen voldoen. Van een gasmotor met nageschakelde technieken⁸⁵ moet worden aangetoond dat aan de eisen kan worden voldoen.

Cryocondensatie wordt gebruikelijk gecombineerd met adsorptie zonder terugwinning of RTO, technieken waarmee de vereiste lage dampconcentratie aan VOS kan worden gegarandeerd. Adsorptie zonder dampterugwinning en een RTO zijn zonder voorbehandeling minder geschikt om hoge dampconcentraties te behandelen.

Uit de uitgevoerde proefnemingen blijkt dat de emissiegrenswaarde voor benzeen kritisch is bij het behandelen van dampen van producten met een hoog benzeengehalte, vooral voor de gasmotoren is dit samen met de NO_x-emissie een punt van aandacht. Deze is door de hoge verbrandings-temperatuur in de compressieslag van de motoren hoger dan bij de andere technieken. Deze hoge concentraties kunnen mogelijk worden gemitigeerd door het toepassen van een geschikte driewegkatalysator voor VOS en NO_x, oxidatiekatalysator voor VOS en SCR voor NO_x. Vooralsnog is niet aangetoond dat de gasmotor aan de toepasselijke emissie-eisen kan voldoen

7.5.2 BBT-geassocieerde emissieniveaus

De emissie-eisen zoals die gesteld zijn in de wetgeving zijn als uitgangspunt genomen voor BBT. De BBT-geassocieerde emissieniveaus voor vergelijkbare activiteiten zijn aangegeven in de volgende tabel. Voor dampverwerking van restdampen gelden in beginsel de algemene emissie-eisen voor de emissie naar de lucht zoals vermeld in de onderstaande tabel.

⁸⁵ Voor een gasmotor met vonkontsteking is, aanvullend op een driewegkatalysator, een nageschakelde SCR nodig om te kunnen voldoen aan de NO_x-emissiegrenswaarde voor een gasmotor; voor een gasmotor met compressieontsteking zijn een roetfilter (DPF), een katalytische oxidatie (DOC), een SCR en een ammoniakcatalysator (ASC) nodig om te kunnen voldoen aan de emissiegrenswaarden voor een gasmotor

Tabel 7.1 – BBT-geassocieerde emissieniveaus

Afgas	Referentie	Naar tank		Naar de lucht	
		AVFL	VOS	Benzeen**	NOx als NO ₂
			[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]	[mg/Nm ³]
Algemene eisen voor restdampen					
• Lucht met productdamp	VOS	n.v.t.	50	1	n.v.t.
• Rookgas van verbrandingsinstallaties	Droog, 3% O ₂	n.v.t.	50	1	100
Ladingtank en dampterugwinning					
• Lucht met productdamp uit producttank	Explosiegrens	10%LEL*	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.
• Lucht met benzinedamp	KWS als C***	n.v.t.	150	1	n.v.t.

n.v.t.: niet van toepassing; KWS: koolwaterstoffen

* Kenmerkende waarde 0,9 g/Nm³ voor benzine en 0,32 g/Nm³ voor benzeen bij 15°C

** Het emissieniveau geldt voor de som van alle minimalisatieverplichte stoffen

*** Bij een benzineoverslaginstallatie, gemiddelde concentratie dampen⁸⁶ in de afvoer van een dampterugwinnings- of dampverbrandingseenheid, gecorrigeerd voor de verdunning tijdens de behandeling, voor een uur

Afhankelijk van de gehalte aan benzeen⁸⁷ in de productdamp zal de grenswaarde voor VOS dan wel voor benzeen de begrenzing bepalen van de vereiste emissiereductie van de dampbehandelingstechniek. Daarnaast is voor een gasmotor nog het volgende emissieniveau indicatief voor BBT-geassocieerde emissieniveaus:

- Ammoniak (ingeval van SCR): 5 mg/Nm³

7.5.3 Kosteneffectiviteit

De kosten worden in hoofdzaak bepaald door het verbruik (energie en grondstoffen) en in mindere mate door de vaste kosten van de installatie (aanschrijving, bediening en onderhoud). De netto kosten van een gasmotor hangen af of de opgewerkte elektriciteit kan worden geleverd aan het net of anderszins nuttig aangewend; voor condensatie of het condensaat als product kan worden verkocht of als afval met bijbehorende kosten moeten worden afgevoerd. De kosteneffectiviteit is berekend voor een kenmerkende situatie met:

- Ontgassen van 100 schepen met benzinedamp in ladingtanks van 5.000 m³ per schip
- Rentevoet: 5% per jaar
- Afschrijvingstermijn: 10 jaar

Zonder beschouwing van de kosten voor gebruik van de kade en de lokale nutsvoorzieningen loopt de berekende kosteneffectiviteit uiteen van ca. 3 EUR per vermeden kg VOS voor condensatie met terugwinning tot ca. 0,5 EUR/kg voor verbranding in een eenvoudige naverbrander, tot 0,2 EUR/kg in een gasmotor met teruglevering van opgewekte elektriciteit aan het net. Dit betekent dat de beschouwde technieken voor dampverwerking van het ontgassen binnenvaarttankers allen als kosteneffectief worden gezien volgens de Omgevingsregeling, bijlage XXX omdat de

⁸⁶ In de Benzinerichtlijn (Richtlijn 94/63/EG van 20 december 1994) is aangegeven wat onder damp wordt verstaan. Het gaat om totaal koolwaterstoffen inclusief methaan. In andere artikelen worden 'vluchtige organische stoffen', uitgedrukt in totaal organische koolstof bepaald volgens [NEN-EN 12619](#) (FID).

⁸⁷ en mogelijk andere ZZS

berekende waarden beduidend lager zijn dan de onderkant van het afwegingsgebied voor VOS (8 – 15 EUR/kg).

7.5.4 Gevolgen voor het milieu

Met de beschouwde dampverwerkingstechnieken wordt de VOS-uitstoot van het ontgassen sterk verminderd maar zijn er wel andere gevolgen voor het milieu, zoals effecten op de volksgezondheid, natuur en klimaatverandering. Milieuschade ontstaat bijvoorbeeld door het produceren van vloeibare stikstof, propaan, diesel, actiefkool en elektriciteit en door de rookgassen van verbrandingstechnieken (thermische oxidatie). Baten zijn mogelijk door het nuttig gebruiken van teruggewonnen product (condensaat) en het nuttig gebruiken van elektriciteit opgewerkt middels een gasmotor. De gevolgen, kosten en baten, zijn zoveel mogelijk kwantitatief in beeld gebracht door gebruik te maken van milieuprijzen [CE Delft 2023].

De milieubaten door de vermeden VOS-uitstoot afkomstig van benzine aanzienlijk groter zijn dan de milieuschadecosten door de inzet van de dampbehandelingstechnieken. De milieubaten zijn groter dan de milieukosten met een factor:

- Condensatie: 30 keer
- Verbrandingstechnieken: 4 – 6 keer

Gelet op de milieukosten en -baten is dampterugwinning een factor drie⁸⁸ gunstiger dan de verbrandingstechnieken. Dit wordt vooral veroorzaakt door de oxidatie van de koolwaterstoffen in de damp waarbij kooldioxide (broeikasgas) ontstaat en in mindere mate door de vorming van stikstofoxiden (NOx).

7.6 Conclusies

De gebruikelijke vaste dampterugwinningsinstallaties die toegepast worden en commercieel beschikbaar zijn, al dan niet aangevuld met een RTO, zijn ook geschikt voor het ontgassen van de productgroepen van fase I en II. Een vijftal technieken zijn geschikt voor mobiele dampverwerking van ontgassingsdamp van binnenvaarttanks, al dan niet gecombineerd. Deze technieken worden beschouwd als bewezen techniek. Daarnaast zijn deze technieken kosteneffectief volgens het wettelijk afwegingsgebied voor VOS. De technieken kunnen voldoen aan de BBT-geassocieerde emissieniveaus die gesteld worden aan vergelijkbare technieken. Voor de gasmotor met aanvullende reinigingstechnieken en de eenvoudige naverbrander (VCU) moet dit nog worden aangetoond, met name bij de verwerking van stoffen met hoge benzeenconcentraties.

Voor benzine geldt dat de milieubaten door de vermeden VOS-uitstoot zijn aanzienlijk groter dan de milieuschadecosten door de inzet van de dampbehandelingstechnieken. Voor benzeen en ethanol, die minder schadelijk⁸⁹ zijn de gemiddelde VOS-stof, geldt dat alleen bij dampterugwinning de milieubaten groter zijn dan de milieuschade. Elke vorm van thermische oxidatie leidt hierbij tot netto milieuschade. De beschouwde technieken verschillen in de maatschappelijke kosten

⁸⁸ Berekend als verhouding van [verschil van netto milieubaten anders dan VOS-verwijdering van de verbrandingstechniek] gedeeld door de [netto milieubaten anders dan VOS-verwijdering van dampterugwinning]

⁸⁹ De milieuprijs van benzeen en ethanol bedraagt 0,366 euro/kg en 0,271 euro/kg, terwijl de milieuschadeprijs van niet-methaan VOS 2,73 euro/kg bedraagt (centrale waarde; [CE Delft, 2023]), waarschijnlijk vanwege het lagere ozonvormend vermogen (smog)

en baten, waar benzinedampterugwinning een factor drie⁹⁰ gunstiger is dan de verbrandingstechnieken. Dit is in lijn met de BBT 9 van de BBT-conclusies afgasbehandeling in de chemische industrie [EU 2022/2427], waarin het terugwinnen van productdamp de voorkeursbehandelingsmethode is.

7.7 Aanbevelingen

Aandacht en prioriteit voor circulair verwerken door dampterugwinning

Aanbevolen wordt om meer aandacht en prioriteit te geven aan circulariteit bij het behandelen van ladingdampen overeenkomstig de afvalhiërarchie in hoofdstuk 10 van de Wet milieubeheer en in analogie met de dampterugwinningsregels voor de overslag van benzine in tankterminals volgens Bal paragraaf 4.105. Overweeg een verplichting tot dampterugwinning voor productdamp waarvan het dampcondensaat een nuttige toepassing kan krijgen. Zonder een verplichting is het weinig waarschijnlijk dat damp zal worden teruggewonnen gelet op de hogere kosten.

Terugwinnen van de brandstoffen uit binnenvaartschepen is een passende stap om het gebruik van primaire abiotische grondstoffen (waaronder fossiele grondstoffen) met 50% te verminderen in 2030 op weg naar de Nederlandse ambitie van een economie zonder afval in 2050. Terugwinnen van de brandstoffen uit binnenvaartschepen heeft daarom op milieutechnische gronden en vanuit beleidsoverwegingen de voorkeur boven vernietiging van damp.

Bepalen van de dampconcentratie in de ontgaste ladingtanks

Aanbevolen wordt om een algemeen geaccepteerd meetprotocol te ontwikkelen over hoe de dampconcentratie te meten in relatie tot de AVFL, rekening houdende met de volgende aspecten:

- Representatief punt om de dampconcentratie naar de ontvangstinrichting te bepalen
- Meetduur
- Verificatie per ladingtank in het geval van het gelijktijdig ontgassen van meerdere ladingtanks.
- Heterogeniteit van ladingtanks door luchtpockets of plassen
- Vastlegging van resultaten en goedkeuring in een verslag

Gehalogeneerde koolwaterstoffen

Aanbevolen wordt het ontgassingsverbod uit te breiden voor gehalogeneerde koolwaterstoffen aangezien deze niet zijn genoemd in de lijsten van CDNI Besluit 2017-I-4, aanhangsel IIIa. Er is gebleken dat er ook gehalogeneerde stoffen worden geventileerd tijdens de vaart. Dit is zeer ongewenst. Verscheidene gehalogeneerde koolwaterstoffen hebben zeer zorgwekkende eigenschappen.

⁹⁰ Berekend als verhouding van [verschil van netto milieubaten anders dan VOS-verwijdering van de verbrandingstechniek] gedeeld door de [netto milieubaten anders dan VOS-verwijdering van dampterugwinning]

Kenmerk R001-1292542RAX-V05

Mengsels met hoog benzeengehalte

De leveranciers van technieken worden aangeraden bijzondere aandacht te besteden aan de verwijdering van benzeen in mengsels met een hoog benzeengehalte, bijvoorbeeld door het toepassen van oxidatiekatalysatoren bij gasmotoren. Het bevoegde gezag wordt aanbevolen om hier in de vergunningverlening aandacht aan te besteden en heldere meetverplichtingen over op te nemen.

Gasmotor als aandrijving voor een elektriciteitsgenerator

Aanbevolen wordt om de juridische en technische mogelijkheden te onderzoeken van een gasmotor met een elektriciteitsgenerator die tijdens de vaart van een binnenvaarttanker de benzinedamp gebruikt om te voorzien in de eigen elektriciteitsbehoefte.

8 Literatuur

Antea 2013	Praktijk onderzoek 'Ontgassen binnenvaart'; Inventarisatie van emissies, werkwijze en handelingen bij het ontgassen van ladingtanks bij binnenvaartschepen; Antea projectnr. 0264182.00, revisie 2.1; december 2013
API 2014	Energy Institute Hydrocarbons Management HM 65 & API Manual of Petroleum Measurement Standards Chapter 19.5; Atmospheric Hydrocarbon emissions from Marine Vessel Transfer; Operations; 1st Edition, September 2009; Reaffirmed October 2014
API 2018	American Petroleum Institute (API); Refinery Stream Composition Data; referentie 4723-A; 1 december 2018
API 2021	Compendium of Greenhouse Gas Emissions Methodologies for the Natural Gas and Oil Industry; American Petroleum Institute; November 2021
CE Delft 2023	Ministerie van Infrastructuur en Milieu: Handboek Milieuprijzen 2023; CE Delft (Publicatienummer 23.220175.034), februari 2023
EU 2022/2427	Uitvoeringsbesluit 2022/2427 van 6 december 2022 tot vaststelling van de BBT-conclusies voor gangbare systemen voor gemeenschappelijk(e) behandeling en beheer van afgassen in de chemiesector
Taskforce 2021	Rapportage conclusies en aanbevelingen, Proefnemingen Varend Ontgassen; Taskforce Varend Ontgassen; januari 2021
TAUW 2022	Luchtemissiebeperkende technieken, handreiking; TAUW 001-1277907BRA-V03-aao-NL; 29 april 2022
UN 2023 Modelvoorschriften	Recommendations on the TRANSPORT OF DANGEROUS GOODS, Model Regulations, Volume I; Twenty-third revised edition, 2023; UNITED NATIONS, New York and Geneva.
US EPA	AP-42: Compilation of Air Emissions Factors
VOTOB 2023	ZZS in aardolieproducten; Vereniging van Nederlandse Tankopslagbedrijven; TAUW-rapport R001-1282274MCP-V05-nnc-NL; 9 maart 2023

Bijlage 1 Leveranciers die informatie hebben verstrekt voor het onderzoek

Bedrijf	Techniek	Werking
AQ	VRU	Cryogene condensatie met vloeibare stikstof
CTS / Triple D	RTO	Regeneratieve thermische oxidatie
	FTO	Vlamloze thermische oxidatie
	MVR/CTU	Cryogene condensatie met elektrische koelmachine
Greenpoint Shared Services	ECI	Gasmotor met driewegkatalysator
Kranz	RTO	Regeneratieve thermische oxidatie
Mourik Services	NanoVapor	Dampremmend middel
REYM/HVMT	CO	Katalytische oxidatie
Shipping Solutions*	MRC	Cryogene condensatie met vloeibare stikstof
		Cryogene condensatie met elektrische koelmachine
		Combinatie van voorgaande
SIS / Endegs / ETS Group	VCU	Eenvoudige naverbrander
Vape to Power	Generator	Gasmotor
WTE-Tech	FTO	Vlamloze thermische oxidatie
	MVR	Condensatie door dampcompressie

* Voorheen Mariflex

Bijlage 2 CDNI Besluit 2017-I-4, aanhangsel IIIa

Ontgassingsstandaarden

A. Algemene bepalingen

1. De dampen van de goederen vermeld in Tabellen I tot en met III van dit Aanhangsel mogen niet in de atmosfeer uitgestoten worden, tenzij aan de voorwaarden betreffende de AVFL-waarden⁹¹ in onderstaande tabellen voldaan is. De dampen van deze goederen moeten worden ontgast, tenzij anders wordt bepaald in artikel 7.04 of dit Aanhangsel.
2. Het ontgassen moet plaatsvinden bij een ontvangstinrichting die is toegelaten krachtens de nationale bepalingen.
3. De dampen van alle goederen die niet in de onderstaande tabellen van de ontgassingsstandaarden voorkomen, mogen worden geventileerd.
4. Het ventileren is niet toegestaan: a) bij sluisen, met inbegrip van hun voorhavens, onder bruggen of in dichtbevolkte gebieden, b) in gebieden met een overeenkomstige bescherming door nationale voorschriften.
5. De procedure inzake het ontgassen of ventileren moet worden onderbroken tijdens onweer en indien ten gevolge van ongunstige windomstandigheden gerekend moet worden met de aanwezigheid van gevaarlijke dampen buiten de zone van de lading, vóór de woonruimte, het stuurhuis of de bedrijfsruimten. De kritieke toestand is bereikt zodra door meting met draagbare meetapparatuur een dampconcentratie van meer dan 20% van de onderste explosiegrens (LEL) in deze zones is aangetoond.
6. Het ontgassen mag alleen door gekwalificeerde personen worden uitgevoerd. Dit betreft tevens de vereiste werkzaamheden aan boord van het schip⁹².

B. Toelaatbare waarde voor vrij ventileren (AVFL)

1. De toelaatbare waarde voor vrij ventileren (AVFL) van een ladingtank is gedefinieerd als de dampconcentratie in de ladingtank waaronder het vrijkomen van de dampen in de atmosfeer toelaatbaar is⁹³.
2. De dampconcentratie wordt overeenkomstig de in het ADN voorziene methoden, meettechnieken en meetapparatuur gemeten op een representatief punt in de leiding die loopt van de ladingtank naar de ontvangstinrichting voor dampen of op de punten in de ladingtank die door de deskundige⁹⁴ als geëigend worden beschouwd. De meting vindt plaats bij standaardomstandigheden en wordt na 30 minuten herhaald. In de losverklaring wordt onder nummer 21 bevestigd dat de aldus gemeten waarde onder de grenswaarde lag.

⁹¹ Accepted Vent Free Level: toelaatbare waarde voor vrij ventileren.

⁹² Aan de kant van de ontvangstinrichting: deskundige personen van de ontvangstinrichting voor dampen. Aan scheepszijde: deskundige persoon volgens de bepalingen van het ADN

⁹³ Deze waarde is gelijk aan 10% van de onderste explosiegrens (Lower Explosive Limit of LEL).

⁹⁴ Deskundige in de zin van de bepalingen van het ADN.

C. Vervoer waarbij een ontgassing van de ladingtanks na het lossen niet noodzakelijk is

1. Transporten van goederen die in schepen van het type N-open of N-open met vlamkerende inrichtingen mogen worden vervoerd. Dit geldt ook voor goederen die in de navolgende tabellen genoemd worden.
2. Eenheidstransporten.
3. Transporten met verenigbare vervolglading overeenkomstig artikel 7.04, derde lid, onderdelen b en c.
4. Transporten van goederen met een dampdruk van minder dan 5 kPa bij 20 °C

D. Betekenis van de kolommen in de onderstaande Tabellen I tot en met III

1. "UN-nummer": nummer bestaande uit vier cijfers dat goederen of voorwerpen identificeert overeenkomstig de UN-modelvoorschriften
2. "Goederennaam": omschrijving van de vervoerde lading.
3. "AVFL": waarde van de concentratie van de dampen in de ladingtank (in vol.-%) waaronder vrij ventileren is toegestaan.
4. "Opmerkingen": aanvullingen inzake de behandeling van bepaalde goederen

De afkorting N.E.G. staat voor 'niet elders genoemd'.

Tabel I

UN-NUMMER	Goederennaam	AVFL (vol.- %)	Opmerkingen
UN 1114	Benzeen	0,12	1)
UN 1203	Benzine of motorbrandstof	0,14	2)
UN 1268	Aardoliedestillaten, aardolieproducten, N.E.G.	-	3)
UN 3475	Ethanol en benzine, mengsel van ethanol en motorbrandstof, mengsel met meer dan 10% ethanol	0,14	2)

- 1) De AVFL wordt gelijkgesteld aan die van benzeen.
- 2) De AVFL wordt gelijkgesteld aan die van benzine.
- 3) De AVFL (gelijk aan 10% van de onderste explosiegrens) moet worden meegegeeld door de verlader aangezien de LEL afhankelijk is van de samenstelling van het mengsel.

Tabel II

UN-NUMMER	Goederennaam	AVFL (vol.- %)	Opmerkingen
UN 1267	Ruwe aardolie (met meer dan 10% benzeen)	0,12	1)
UN 1993	Ontvlambare vloeistof, N.E.G met meer dan 10% benzeen	0,12	1)
UN 3295	Koolwaterstoffen, vloeibaar, N.E.G., met meer dan 10% benzeen	0,12	1)

- 1) De AVFL wordt gelijkgesteld aan die van benzeen.

Tabel III

UN-NUMMER	Goederennaam	AVFL	Opmerkingen
UN 1090	Aceton	0,26	
UN 1145	Cyclohexaan	0,10	
UN 1170	Ethanol (ethylalcohol) of ethanol, oplossing (ethylalcohol, oplossing), waterige oplossing met meer dan 70 volumeprocent alcohol	0,31	
UN 1179	Ethyl-tert-butylether	0,16	
UN 1216	Iso-octenen	0,08	
UN 1230	Methanol	0,60	
UN 1267	Ruwe aardolie (met minder dan 10% benzeen)	0,12	
UN 1993	Ontvlambare vloeistof, N.E.G., met minder dan 10% benzeen	-	1) 3)
UN 2398	Methyl-tert-butylether	0,16	
UN 3257	Verwarmde vloeistof, N.E.G., bij een temperatuur gelijk aan of hoger dan 100 °C en lager dan haar vlampunt (met inbegrip van gesmolten metaal, gesmolten zout, enz.)	-	3)
UN 3295	Koolwaterstoffen, vloeibaar, N.E.G., met minder dan 10% benzeen	-	3)
9001	Stoffen met een vlampunt van meer dan 60 °C, die binnen een grenswaarde van 15 K onder het vlampunt verwarmd of stoffen met $vp > 60$ °C, binnen minder dan 15 K onder het vp, ter vervoer worden aangeboden of vervoerd worden	-	3), 4)
9003	Stoffen met een vlampunt van meer dan 60 °C en ten hoogste 100 °C of stoffen met 60 °C < $vp \leq 100$ °C, die niet in andere klassen of in klasse 9 ingedeeld kunnen worden	-	3), 4)

1) De AVFL wordt gelijkgesteld aan die van benzeen.

3) De AVFL (gelijk aan 10% van de onderste explosiegrens) moet worden meegedeeld door de verlader aangezien de LEL afhankelijk is van de samenstelling van het mengsel.

4) Aanwijzing: 9001 en 9003 zijn geen UN-nummers overeenkomstig de modelvoorschriften. Het zijn zogenaamde stofnummers, die uitsluitend met het oog op het ADN en de tankvaart werden ingevoerd.

Ontvlambare vloeistof

De volgende definitie van een ontvlambare vloeistof is gegeven in de UN 2023 Modelvoorschriften

2.3.1.2 Flammable liquids are liquids, or mixtures of liquids, or liquids containing solids in solution or suspension (for example, paints, varnishes, lacquers, etc., but not including substances otherwise classified on account of their dangerous characteristics) which give off a flammable vapour at temperatures of not more than 60 °C, closed-cup test, or not more than 65.6 °C, open-cup test, normally referred to as the flash point.

This class also includes:

(a) Liquids offered for transport at temperatures at or above their flash point; and

(b) Substances that are transported or offered for transport at elevated temperatures in a liquid state and which give off a flammable vapour at a temperature at or below the maximum transport temperature.

NOTE: Since the results of open-cup tests and of closed-cup tests are not strictly comparable and even individual results by the same test are often variable, regulations varying from the above figures to make allowance for such differences would be within the spirit of this definition.

2.3.1.3 Liquids meeting the definition in 2.3.1.2 with a flash point of more than 35 °C which do not

sustain combustion need not be considered as flammable liquids for the purposes of these Regulations. Liquids are considered to be unable to sustain combustion for the purposes of these Regulations (i.e. they do not sustain combustion under defined test conditions) if:

- (a) They have passed a suitable combustibility test (see SUSTAINED COMBUSTIBILITY TEST prescribed in the Manual of Tests and Criteria, part III, sub-section 32.5.2);
- (b) Their fire point according to ISO 2592:2000 is greater than 100 °C; or
- (c) They are water miscible solutions with a water content of more than 90 % by mass.

Bijlage 3 UN-ladingnummers en stofgroepen

Referentie: UN 2023 Modelvoorschriften

Tabel B3.1 – UN-ladingnummers en stofgroepen

Tabel	UN-Nr.	Goederennaam	Benaming
I	UN 1114	Benzeen	BENZENE Benzol
I	UN 1203	Benzine of motorbrandstof	Casinghead gasoline GASOLINE Gasoline, casinghead MOTOR SPIRIT Natural gasoline PETROL
I	UN 1268	Aardoliedestillaten, aardolieproducten, N.E.G.	Benzolene, Coal tar naphtha Crude naphtha Lythene Naphta Naphta, petroleum Naphta, solvent PETROLEUM DISTILLATES, N.O.S. Petroleum ether Petroleum naphtha Petroleum oil PETROLEUM PRODUCTS, N.O.S. Petroleum raffinate Petroleum spirit
I	UN 3475	Ethanol en benzine, mengsel van ethanol en motorbrandstof, mengsel met meer dan 10% ethanol	ETHANOL AND GASOLINE MIXTURE ETHANOL AND MOTOR SPIRIT MIXTURE ETHANOL AND PETROL MIXTURE GASOLINE AND ETHANOL MIXTURE MOTOR SPIRIT AND ETHANOL MIXTURE
II	UN 1267	Ruwe aardolie (met meer dan 10% benzeen)	PETROLEUM CRUDE OIL
II	UN 1993	Ontvlambare vloeistof, N.E.G met meer dan 10% benzeen	FLAMMABLE LIQUID, N.O.S. Solvents, flammable, n.o.s.
II	UN 3295	Koolwaterstoffen, vloeibaar, N.E.G., met meer dan 10% benzeen	Gas drips, hydrocarbon HYDROCARBONS, LIQUID, N.O.S

N.O.S.: Not otherwise specified

Bijlage 4 Uittreksel van AND 2021

7.2.3.7 Ontgassen van lege of geloste ladingtanks en laad- en losleidingen

7.2.3.7.0 Het ontgassen van lege of geloste ladingtanks en laad- en losleidingen in de atmosfeer of naar ontvangstinrichtingen is toegestaan onder de hieronder genoemde voorwaarden, doch slechts indien en voor zover zulks niet verboden is op grond van andere wettelijke vereisten.

7.2.3.7.1 Ontgassen van lege of geloste ladingtanks en laad- en losleidingen voor laden en lossen in de atmosfeer

7.2.3.7.1.1 Lege of geloste ladingtanks die tevoren gevaarlijke stoffen hebben bevat van:

- klasse 2 of klasse 3 met een classificatiecode waarin de letter "T" voorkomt in kolom (3b) van tabel C van hoofdstuk 3.2;
- klasse 6.1; of
- klasse 8, verpakkingsgroep I;

mogen slechts worden ontgast door een deskundige conform 8.2.1.2. Dit mag alleen worden uitgevoerd op locaties toegelaten door de bevoegde autoriteit.

7.2.3.7.1.2 Indien het ontgassen van ladingtanks die de in 7.2.3.7.1.1 genoemde gevaarlijke stoffen hebben bevat op de door de bevoegde autoriteit voor dit doel toegelaten plaatsen niet praktisch is, kan tijdens de vaart worden ontgast, onder voorwaarde dat:

- aan de voorschriften van de eerste paragraaf in 7.2.3.7.1.3 is voldaan, waarbij echter de concentratie
- van de door de lading afgegeven brandbare gassen en dampen in het uitgeblazen mengsel op de plaats van uittreiding niet meer dan 10 % van de OEG mag bedragen;
- de bemanning niet wordt blootgesteld aan een concentratie van gassen en dampen die nationaal aanvaarde blootstellingsniveaus overschrijdt;
- alle toegangen en openingen van ruimten die met de buitenlucht in verbinding staan zijn gesloten. Dit is niet van toepassing op luchttoevoeropeningen van de machinekamer en op ventilatiesystemen met overdruk;
- de aan dek werkende bemanningsleden geschikte veiligheidsuitrusting dragen;
- dit niet in de nabijheid van sluizen, inclusief hun voorhavens, onder bruggen of in dichtbevolkte gebieden plaatsvindt.

7.2.3.7.1.3 Indien de concentratie van brandbare gassen en dampen die de lading afgeeft, 10 % van de OEG is of hoger, mogen lege of geloste ladingtanks die andere dan de onder 7.2.3.7.1.1 genoemde gevaarlijke goederen hebben bevat, tijdens de vaart of op locaties toegelaten door de bevoegde autoriteit worden ontgast met behulp van geschikte ventilatie-apparatuur, mits de tankdeksels zijn gesloten en de afvoer van het gas/luchtmengsel plaatsvindt via vlamkerende inrichtingen die een duurbrand kunnen doorstaan (explosiegroep / subgroep conform hoofdstuk 3.2, tabel

C, kolom (16)). De concentratie van brandbare gassen en dampen in het uitgeblazen mengsel op de plaats van uittreding moet lager zijn dan 50 % van de OEG. Bij zuigende ontgassing mag geschikte ventilatie-apparatuur alleen worden gebruikt als direct op de zuigzijde van de ventilator een vlamkerende inrichting is aangebracht (explosiegroep / subgroep conform hoofdstuk 3.2, tabel C, kolom (16)). De concentratie van brandbare gassen en dampen moet bij blazende of zuigende werking van de ventilatie-apparatuur tijdens de eerste twee uren na het begin van het ontgassen ieder uur door een deskundige als bedoeld in 8.2.1.2 worden gemeten. De meetresultaten moeten schriftelijk worden vastgelegd.

Ontgassen is echter niet toegestaan in de nabijheid van sluizen, inclusief hun voorhavens, onder bruggen of in dichtbevolkte gebieden. Indien de concentratie van brandbare gassen en dampen die de lading afgeeft, onder 10 % van de OEG ligt, mogen lege of geloste ladingtanks die andere dan de onder 7.2.3.7.1.1 genoemde gevaarlijke goederen hebben bevat, worden ontgast, en mogen extra openingen van de ladingtank worden geopend mits de bemanning niet wordt blootgesteld aan een concentratie van gassen en dampen die nationaal aanvaarde blootstellingsniveaus overschrijdt. Ook is het niet verplicht een vlamkerende inrichting te gebruiken. Ontgassen is niet toegestaan in de nabijheid van sluizen, inclusief hun voorhavens, onder bruggen of in dichtbevolkte gebieden.

7.2.3.7.1.4 Ontgassingsactiviteiten moeten worden onderbroken tijdens een onweersbui of indien ten gevolge van ongunstige windomstandigheden gevaarlijke concentraties van brandbare of giftige gassen en dampen buiten de ladingzone bij de woning, het stuurhuis en de dienstruimten te verwachten zijn. De kritische toestand is bereikt zodra concentraties van door de lading afgegeven brandbare gassen en dampen of van giftige gassen en dampen die nationaal aanvaarde blootstellingsniveaus overschrijden, van meer dan 20 % van de OEG in deze gebieden door middel van meting met behulp van een draagbare detectiemeter zijn aangetoond.

7.2.3.7.1.5 Indien na het ontgassen van de ladingtanks met behulp van de in hoofdstuk 3.2, Tabel C, kolom (18) genoemde apparaten is vastgesteld dat geen van de ladingtanks brandbare gassen en dampen bevat in concentraties boven 20 % van de OEG of giftige gassen en dampen in een concentratie die nationaal aanvaarde blootstellingsniveaus overschrijdt, mag de seinvoering als bedoeld in 7.2.5.0.1 in opdracht van de schipper worden weggenomen. De meetresultaten moeten schriftelijk worden vastgelegd.

7.2.3.7.1.6 Vóór het nemen van maatregelen die gevaren zouden kunnen veroorzaken als beschreven in 8.3.5, moeten alle ladingtanks en leidingen in de ladingzone worden ontgast. Dit moet schriftelijk worden vastgelegd in een gasvrij-certificaat dat geldig is op de dag waarop de werkzaamheden beginnen. De toestand gasvrij mag slechts worden verklaard en gecertificeerd door een persoon erkend door de bevoegde autoriteit.

7.2.3.7.2 Ontgassen van lege of geloste ladingtanks en laad- en losleidingen naar ontvangstinrichtingen

7.2.3.7.2.1 Lege of geloste ladingtanks mogen alleen worden ontgast door een deskundige conform 8.2.1.2. Indien vereist krachtens internationale of nationale wetgeving mag dit slechts worden uitgevoerd op locaties toegelaten door de bevoegde autoriteit. Ontgassen naar een mobiele ontvangstinrichting tijdens de vaart, is verboden. Het is verboden te ontgassen naar een mobiele ontvangstinrichting terwijl een ander schip bezig is met ontgassen naar dezelfde inrichting. Ontgassen naar een mobiele ontvangstinrichting aan boord, is verboden.

7.2.3.7.2.2 Alvorens met ontgassing te beginnen, moet het ontgassingsschip geaard zijn. De schipper van het ontgassingsschip of een door hem gemachtigde deskundige conform 8.2.1.2 en de exploitant van de ontvangstinrichting moeten een controlelijst als bedoeld in 8.6.4 van het ADN hebben ingevuld en ondertekend.

De controlelijst moet ten minste in talen zijn gedrukt die worden begrepen door de schipper of de deskundige en de exploitant van de ontvangstinrichting. Indien niet alle van toepassing zijnde vragen positief kunnen worden beantwoord, is ontgassing naar een ontvangstinrichting slechts met toestemming van de bevoegde autoriteit toegestaan.

7.2.3.7.2.3 Het ontgassen naar ontvangstinrichtingen mag worden uitgevoerd met behulp van de laad- en losleidingen of de gasafvoerleiding voor verwijdering van de gassen en dampen uit de ladingtanks terwijl de overige leidingen respectievelijk worden gebruikt om overschrijding van de maximaal toelaatbare over- en onderdruk in de ladingtanks te voorkomen.

De leidingen moeten deel uitmaken van een gesloten systeem of, indien ze worden gebruikt om overschrijding van de maximaal toelaatbare over- en onderdruk van de ladingtanks te voorkomen, zijn uitgerust met een vast aangebracht of draagbaar veerbelast lagedrukventiel, met vlamkerende inrichting (explosiegroep / subgroep conform hoofdstuk 3.2, tabel C, kolom (16), indien explosiebescherming vereist is in hoofdstuk 3.2, tabel C, kolom (17)). Dit lagedrukventiel moet op zodanige wijze zijn geïnstalleerd dat onder normale bedrijfsomstandigheden het onderdrukventiel niet in werking wordt gesteld. Een permanent geïnstalleerd ventiel of de opening waarop een los ventiel is aangesloten, moet gesloten blijven met een blindflens wanneer het schip niet naar een ontvangstinrichting aan het ontgassen is.

Alle leidingen tussen het ontgassingsschip en de ontvangstinrichting moeten zijn uitgerust met een geschikte vlamkerende inrichting, indien volgens hoofdstuk 3.2, tabel C, kolom (17) explosiebescherming vereist is.

De vereisten voor leidingen aan boord moeten zijn: Explosiegroep / subgroep conform hoofdstuk 3.2, tabel C, kolom (16).

7.2.3.7.2.4 Het moet mogelijk zijn de ontgassingsactiviteiten te onderbreken door middel van schakelaars gemonteerd op twee plaatsen aan boord van het schip (voor en achter) en op twee plaatsen op de ontvangstinrichting (direct bij de toegang tot het schip en bij de plaats waar de

ontvangstinrichting functioneert). De onderbreking van het ontgassen moet worden bewerkstelligd met behulp van een snelsluitventiel rechtstreeks gemonteerd in de koppeling tussen het ontgassingsschip en de ontvangstinrichting. Het systeem voor de ont koppeling moet zijn ontworpen overeenkomstig het principe van het gesloten circuit en mag worden ingebouwd in de noodstopvoorziening van de ladingpompen en overvullingsbeveiligingen als bedoeld in 9.3.1.21.5, 9.3.2.21.5 en 9.3.3.21.5.

Ontgassingsactiviteiten moeten worden onderbroken tijdens een onweersbui.

7.2.3.7.2.5 Indien na het ontgassen van de ladingtanks met behulp van de in hoofdstuk 3.2, tabel C, kolom (18) genoemde apparaten is vastgesteld dat geen van de ladingtanks brandbare gassen en dampen bevat in concentraties boven 20 % van de OEG of giftige gassen en dampen in een concentratie die nationaal aanvaarde blootstellingsniveaus overschrijdt, mag de se invoering als bedoeld in hoofdstuk 3.2, tabel C, kolom (19) in opdracht van de schipper worden weggenomen. De meetresultaten moeten schriftelijk worden vastgelegd.

7.2.3.7.2.6 Vóór het nemen van maatregelen die gevaren zouden kunnen veroorzaken als beschreven in 8.3.5, moeten alle ladingtanks en leidingen in de ladingzone worden ontgast. Dit moet schriftelijk worden vastgelegd in een gasvrij-certificaat dat geldig is op de dag waarop de werkzaamheden beginnen. De toestand gasvrij mag slechts worden verklaard en gecertificeerd door een persoon erkend door de bevoegde autoriteit.

Bijlage 5 Proefnemingen met vrij ontgassen

In opdracht van het ministerie van Rijkswaterstaat Water, Verkeer en Leefomgeving heeft Antea Group in samenwerking met Promonitoring in 2013 een meetonderzoek⁹⁵ uitgevoerd naar de praktijk van het ontgassen van binnenvaarttankers. Het onderzoek biedt onder andere een inzicht in de hoeveelheid restdampen die achterblijven in een scheepstank na het lossen.

De ventilatiekenmerken van het ontgassen zijn in de volgende tabel samengevat. Kenmerkende waarden zijn een ventilatiedebiet van 600 Nm³/uur gedurende 7 uur. Het kenmerkende ventilatievoud is 2,4.

Tabel B5.1 – Ventilatiekenmerken

Schip	Lading	Volume [m ³]	Debiet [Nm ³ /uur]	Duur [uur]	Ventilatie- voud
A	N-Butylacetaat	1.800	817	7,5	3,7
B	Ethanol	2.058	639	7	2,4
C	MTBE	3.064	110	5	0,2
D	Aardoliedestillaat > 10 %benzeen	1.705	580	7,5	2,8
E	Tolueen	3.038	350	7	0,9
F	IPA/solvesso	2.093	650	7	2,4
G	Methanol	1.900	730	7	2,9
H	Ethanol	1.825	585	6	2,1
	Mediaan		612	7	2,4

⁹⁵ Praktijkonderzoek 'Ontgassen binnenvaart', Inventarisatie van emissies, werkwijze en handelingen bij het ontgassen van ladingtanks bij binnenvaartschepen; Antea Group projectnr. 0264182.00, revisie 2.1; december 2013

De gemeten concentraties zijn in de volgende tabel samengevat en vergeleken:

- VOS-concentratie aan het begin met verzadigde damp
- VOS-concentratie aan het eind met de AVFL-concentratie

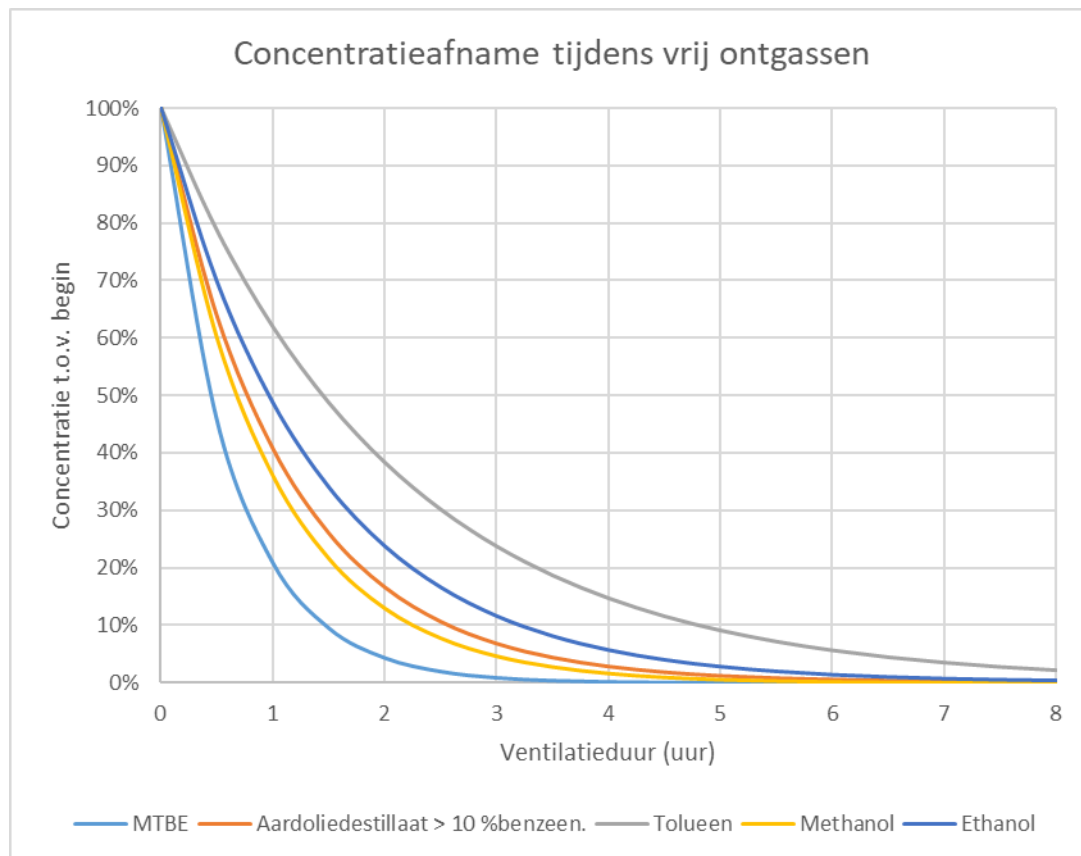
De damp bij aanvang van de ontgassing is in de meeste gevallen verzadigd. De gemeten eindconcentratie komt ordegrrootte overeen met de vereiste AVFL-concentratie al zijn er uitzonderingen. De eindconcentratie bedraagt ordegrrootte 1.000 mg/m³.

De tabel laat ook zien dat als er minder dan één keer het tankvolume wordt geventileerd (ventilatievoud < 1) de eindconcentratie niet voldoet aan de AVFL-concentratie.

Tabel B5.2 – Gemeten concentraties in de damp

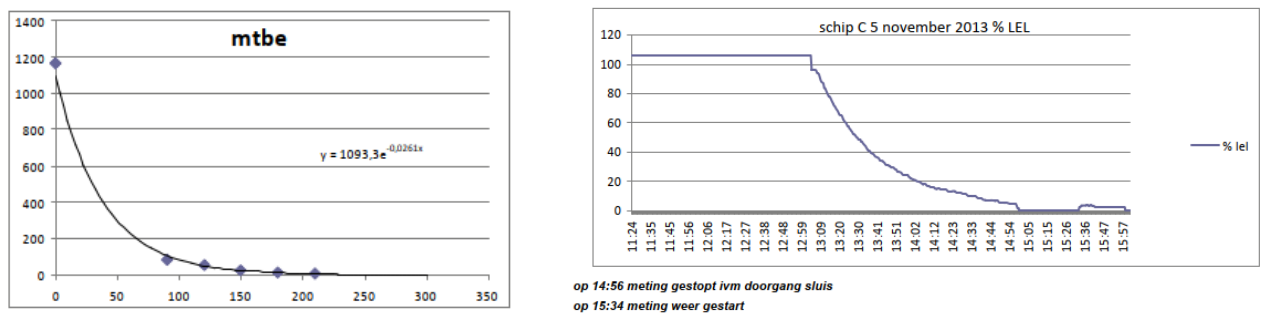
Schip	lading	Beginconcentratie [mg/Nm ³]	Verzadiging [% m/m]	Ventilatievoud [-]	Eindconcentratie [mg/Nm ³]	AVFL concentratie [mg/Nm ³]	
A	N-Butylacetaat	n.b.	n.b.	3,7	2.014	425	Aangenomen: 1%
B	Ethanol	n.b.	n.b.	2,4	n.b.	n.b.	CDNI: 0,31%
C	MTBE	1.093.300	1	0,2	3.420	1.348	CDNI: 0,16%
D	Aardoliedestillaat > 10 %benzeen	1.169.200	0,9	2,8	837	1.832	CDNI: 0,12-0,14%
E	Tolueen	128.360	1	0,9	3.066	108	LEL/10: 0,12%
F	IPA/solvesso	n.b.	n.b.	2,4	414	778	Aangenomen: 1%
G	Methanol	156.530	0,3	2,9	745	835	CDNI: 0,6%
H	Ethanol	61.106	0,7	2,1	1.951	272	CDNI: 0,31%
	Mediaan		0,9	2,4		778	

Tijdens het verloop van een ontgassing is een aantal keer de concentratie gemeten, met name aan het einde van het ontgassen. Op basis hiervan is een relatie afgeleid, waarbij de eerste paar uur zijn geïnterpoleerd tussen de beginconcentratie en een viertal metingen na enkele uren. Deze zijn samengevat in de volgende grafieken. De eerste grafiek geeft de afname van de concentratie in de tijd weer.



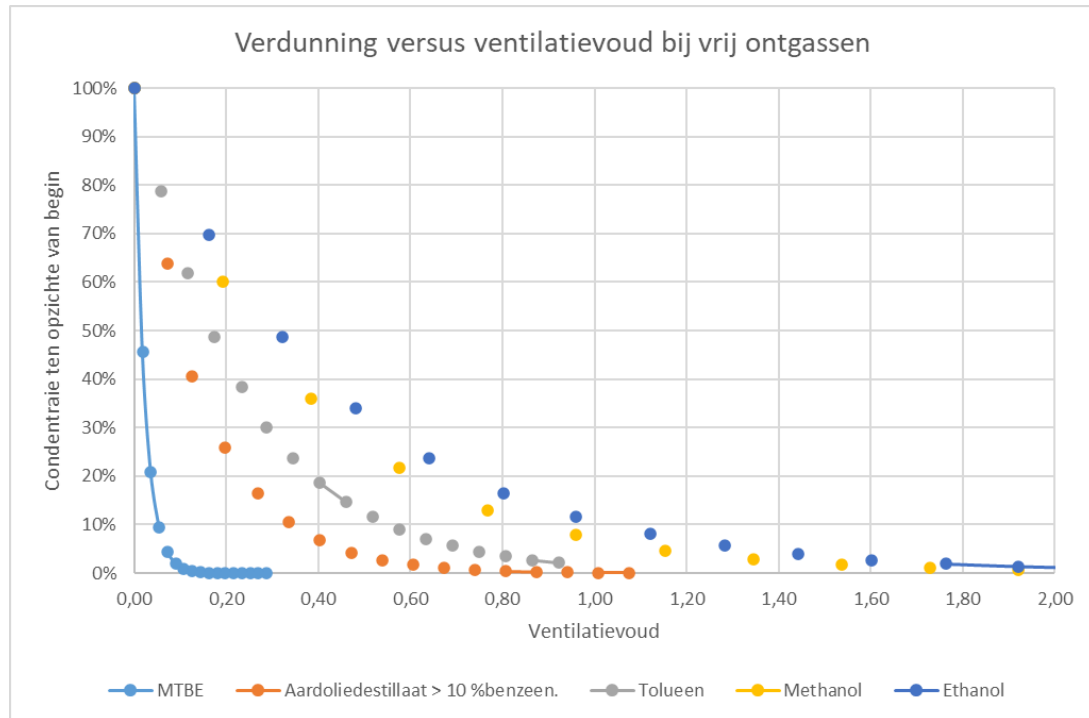
Figuur B5.1 – Afname van de VOS-concentratie in de lucht uit de scheepstank tijdens het ontgassen (tijdsduur)

De concentratieafname gemeten met de explosiemeter laat een ander verloop aan het begin zien.



Figuur B5.2 – Vergelijking tussen het concentratie verloop gemeten met VOS-meting en met explosiemeter.

De volgende grafiek geeft de afname van de concentratie als functie van het ventilatievoud weer. De vluchtigere producten zoals MTBE en 'aardoliedestillaat > 10% benzeen' lijken sneller te verdampen dan de minder vluchtige zoals methanol en ethanol. Toluene verdampst sneller dan alleen op basis van de dampspanning kan worden verwacht maar er zijn ook andere factoren die de verdampingssnelheid kunnen bepalen.



Figuur B5.1 – Afname van de VOS-concentratie in de lucht uit de scheepstank tijdens het ontgassen (ventilatievoud)

Bijlage 6 Proefnemingen met dampbehandeling

In de periode mei-december 2020 heeft de Taskforce Varend Ontgassen een reeks proefnemingen uitgevoerd met dampverwerkingsinstallaties van vijf verschillende bedrijven. Het doel was om het volgende te onderzoeken:

- Geschiktheid voor het ontgassen tot 10% LEL na 30 minuten
- Voldoen van de emissie van de techniek aan algemene emissie-eisen

De proefnemingen zijn uitgevoerd in praktijksituaties met de opdracht om een binnenvaarttanker volledig te ontgassen binnen de bestaande wet- en regelgeving ongeacht wisselende omstandigheden zoals buitentemperatuur, samenstelling restdampen, luchtvochtigheid, tonnage, aantal ladingtanks etc. De onderzoeksresultaten die gepubliceerd in het openbaar rapport⁹⁶ zijn samengevat in de onderstaande tabellen.

De bij de proeven betrokken dampbehandelingstechnieken zijn de volgende tabel vermeld. De verklaring van de kolommen is als volgt:

- Techniek: ontgassingstechniek
- Datum: datum van aanvang van de proef
- Voorgaande lading: indicatie van de productvloeistof en -damp in de scheepstanks
- Volume: totaal volume aan opslagcapaciteit, dit is de ruimte waarvan de damp wordt behandeld
- Tanks: aantal producttanks op het schip dat wordt ontgast en behandeld

Tabel B6.1 – Dampbehandeling en kenmerken van de ontgaste binnenvaarttankers

Proef	Techniek	Datum	Voorgaande lading	Volume [m ³]	Tanks [aantal]
A	VCU	07-08-2020	UN 1203, benzine	3763	10
B	Gasmotor	28-05-2020	UN 1268, pygas	1200	9
C	Gasmotor	03-09-2020	UN 1268, nafta C8	2684	14
D	Gasmotor	01-10-2020	UN 3295, pygas	5000	14
E	Gasmotor	20-11-202	UN 1203, benzine	n.b.	10
F	Gasmotor	07-10-2020	UN 3295, pygas	5000	14
G	Condensatie en actiefkool	15-09-2020	UN 1203, benzine	8991	12
H	Condensatie en actiefkool	17-10-2020	UN 1203, benzine	8991	12
I	RTO, voorcondensatie	22-9-2020	UN 1203, benzine	3600	12
J	Condensatie	19-10-2020	UN 1170, ethanol	n.b.	n.b.
K	Condensatie	20-10-2020	UN 1208, hexaan	n.b.	n.b.

n.b.: niet bekend

⁹⁶ Rapportage conclusies en aanbevelingen, Proefnemingen Varend Ontgassen; Taskforce Varend Ontgassen; januari 2021

Bijlage 6a Prestaties van het ontgassen

De prestatie van de dampbehandelingstechniek is weergegeven in de volgende tabel. De verklaring van de kolommen is als volgt:

- Techniek: ontgassingstechniek
- Voorgaande lading: indicatie van de productvloeistof en -damp in de scheepstanks
- Duur: totale duur van het ontgassen met dampbehandeling
- Debiet: gemiddelde ventilatiedebiet uit de scheepstanks
- CxHy, begin: gehalte aan organisch koolstof in de dampstroom uit de scheepstanks (volgens FID) aan het begin van de ontgassing met dampbehandeling
- CxHy, eind: gehalte aan organisch koolstof in de dampstroom uit de scheepstanks (volgens FID) aan het eind van de ontgassing met dampbehandeling
- 10% LEL: indicatie dat de concentratie lager is dan 10% LEL gedurende 30 minuten
- Damp: hoeveelheid verwijderde koolwaterstoffen uit de damp van scheepstanks, hetzij door vernietiging (oxidatie/verbranding), terugwinning (condensatie) of emissie naar de lucht
- Verbruik: indicatie van het verbruik aan brandstof of hulpstof (stikstof), zonder elektriciteit te beschouwen als die niet met een generator lokaal is opgewekt
- LPG: onder druk vloeibaar gemaakt propaan, butaan of een mengsel hiervan

Tabel B6.2 – Prestatie van de dampbehandelingstechniek

Proef	Techniek	Voor- gaande lading	Duur [uur]	Debiet [m ³ /uur]	CxHy begin [gC/m ³]	CxHy eind [gC/m ³]	<10% LEL	Damp [kg]	Verbruik		
A	VCU	Benzine	7		17	7,36	Ja	77	LPG	54	m ³
B	Gasmotor	Pygas	3,5	100	9,5	8,8	Ja	180	LPG	75	m ³
C	Gasmotor	Nafta	7	100	20	20	Ja	56,9	LPG	64	m ³
D	Gasmotor	Pygas	14,5	100	23,7	14,3	Nee	86,7	LPG	91	m ³
E	Gasmotor	Benzine	10	107	52,5		Nee	80	LPG	n.b.	m ³
F	Gasmotor	Pygas	37	1.000		n.b.	Nee	n.b.	LPG	n.b.	m ³
G	Condensatie en kool	Benzine	66	-	46	13	Ja	1.575	Stikstof	21.084	kg
									Diesel	334	liter
H	Condensatie en actiefkool	Benzine	27	-	14	2,6	Ja	78	Stikstof	n.b.	kg
									Diesel	n.b.	liter
I	RTO, voor- condensatie	Benzine	64	338	45	10	Ja	544	LPG	1,2	m ³
									Stikstof	n.b.	kg
									Diesel	n.b.	liter
J	Condensatie	Ethanol	6	575	18	5	Ja	105	Stikstof	n.b.	kg
									Diesel	n.b.	liter
K	Condensatie	Hexaan	10	625	35	25	Nee	35	Stikstof	n.b.	kg
									Diesel	n.b.	liter

n.b.: niet bekend

Cryocondensatie

Dampverwerking van ontgassing met condensatie is onderzocht in de proefnemingen van 2020 [Taskforce 2021]. De opzet en het verloop van de proefneming is in de volgende tabel

samengevat. In tegenstelling tot de verbrandingstechnieken is de behandelde lucht na behandeling teruggeleid (circulatie) naar de producttanks. Dit beperkt onder- of overdruk tijdens het ontgassen. In de laatste fase van het ontgassen van de benzinedamp (laatste 7 uur van 66 uur; laatste 10 uur van 26 uur) is de lucht na condensatie nog nabehandeld in een actiefkoolkolom. De benodigde elektrische stroom is door een dieselaggregaat geleverd.

Tabel B6.3 – Verloop van ontgassing met cryocondensatie als dampbehandelingstechniek

Ref.	Voorgaande lading	Volume [m ³]	Duur [uur]	Debiet [m ³ /uur]	CxHy begin [gC/m ³]	CxHy eind [gC/m ³]	VOS eind [mg/Nm ³]	<10 % LEL	Damp verwijderd [kg]	Damp bij aanvang [kg]	Verbruik [kg]
G	Benzine	8.991	66	n.b.	46	13	3	Ja	1.575	3.346*	N ₂ 21.084 Diesel 283
H	Benzine	8.991	26	n.b.	14	2,6	45	Ja	78*	3.346*	n.b.
J	Ethanol	n.b.	6	300 – 850	18	5	n.b.	Ja	110	n.b.	n.b.
K	Hexaan	n.b.	10	350 – 900	35	25	n.b.	Nee	n.b.	n.b.	n.b.

n.b.: niet bekend

* Onduidelijk

Bij het ontgassen van de ethanol- en hexaandamp wordt de damp de hele tijd teruggeleid. De prestatie van de dampbehandelingstechniek is dan wel van belang. De ontgassing van ethanol-damp is succesvol verlopen in tegenstelling tot hexaandamp. Dit is in lijn met de temperatuur van -40°C voor 99% terugwinning van ethanol en -90°C voor hexaan⁹⁷.

De ontgassing van hexaan is niet succesvol gebleken vanwege het geringe verschil tussen ingangconcentratie en retourconcentratie.

Eenvoudige naverbrander (VCU)

De opzet en het verloop van de proefneming is in de volgende tabel samengevat.

Tabel B6.4 – Verloop van ontgassing met thermische oxidatie als dampbehandelingstechniek

Ref.	Voorgaande lading	Volume [m ³]	Duur [uur]	Debiet [m ³ /uur]	CxHy begin [gC/m ³]	CxHy eind [gC/m ³]	VOS eind [g/Nm ³]	<10 % LEL	Damp verwijderd [kg]	Damp bij aanvang [kg]	Verbruik [m ³]
A	Benzine	3.763	7	n.b.	17	7,4	n.b.	ja	77	1.400*	LPG n.b.

n.b.: niet bekend

* Onduidelijk

De volgende opmerkingen kunnen worden geplaatst bij de metingen:

- De berekende verwijderde hoeveelheid koolwaterstoffen lijkt niet in overeenstemming te zijn met de volume van de producttank en de ontgassingsduur. Gebaseerd op een dampconcentratie van 0,372 kg/Nm³ (kenmerkend zoals eerder aangegeven) komt 77 kg overeen met slechts 207 m³ en een debiet van 30 m³/uur ten opzicht van te ontgassen volume van ca. 3.800 m³, wat onwaarschijnlijk is
- Indien 800 m³/uur als bovengrens van het ontgassingsdebiet wordt aangehouden bedraagt

⁹⁷ Aanname dat de waarde voor benzine en nafta ook geldig is voor hexaan.

Kenmerk R001-1292542RAX-V05

het ventilatievoud 1,5, wat mogelijk heeft volstaan om de AFVL-waarde te bereiken

RTO

Dampverwerking van ontgassing met een RTO is onderzocht in de proefnemingen van 2020 [Taskforce 2021] waarbij condensatie als voorbehandelingsstap is toegepast. Een RTO is niet zonder aanpassingen geschikt voor hoge dampconcentraties. De dampconcentratie kan worden verlaagd door verdunning met omgevingslucht en door een voorbehandeling met een andere techniek.

De opzet en het verloop van de proefneming is in de volgende tabel samengevat.

Tabel B6.5 – Verloop van ontgassing met RTO als dampbehandelingstechniek

Ref.	Voorgaande lading	Volume [m ³]	Duur [uur]	Debiet [m ³ /uur]	CxHy begin [gC/m ³]	CxHy eind [gC/m ³]	VOS eind [g/Nm ³]	<10 % LEL	Damp verwijderd [kg]	Damp bij aanvang [kg]	Verbruik [m ³]
I	Benzine	3.600	64	338	45	10	n.b.	ja	544	187 – 1.400*	LPG n.b.

n.b.: niet bekend

* Onduidelijk, eerste getal gebaseerd op FID-meting van 45 g C/m³ als dampconcentratie bij aanvang, het tweede op 372 g/m³ (kenmerkende waarde)

De volgende opmerkingen kunnen worden geplaatst bij de metingen:

- De berekende verwijderde hoeveelheid koolwaterstoffen van 187 is niet in overeenstemming met de volume van de producttank en de ontgassingsduur
- Met een ventilatievoud van 6 is het aannemelijk dat de AFVL-waarde is bereikt

Gasmotor

De opzet en het verloop van de proefneming is in de volgende tabel samengevat.

Tabel B6.6 – Verloop van ontgassing met gasmotor als dampbehandelingstechniek

Ref.	Voorgaande lading	Volume [m ³]	Duur [uur]	Debiet [m ³ /uur]	CxHy begin [gC/m ³]	CxHy eind [gC/m ³]	VOS eind [g/Nm ³]	<10 % LEL	Damp verwijderd [kg]	Damp bij aanvang [kg]	Verbruik [m ³]
B	Pygas	1.200	3,5	150*	n.b.	9	8,8	Ja	180	253	LPG 75
C	Nafta (C8)	**2.684	7	150*	n.b.	20	20	Ja	57	62	LPG 64
D	Pygas	5.000	14,5	150	23,7	14,3		Nee	87	1.055	LPG 91
E	Benzine	n.b.	10	150*	52,5	n.b.	n.b.	Nee	80	n.b.	LPG n.b.
F	Pygas	5.000	37	150*	n.b.	n.b.	n.b.	15%	n.b.	1.055	LPG n.b.

n.b.: niet bekend

* Niet bepaald tijdens de metingen maar aangenomen omdat dezelfde configuratie is gebruikt bij proefneming E

** Onduidelijk

De volgende opmerkingen kunnen worden geplaatst bij de metingen:

- Meting B: Om de AVFL-waarde te halen zou de concentratie van 50% v/v moeten dalen tot 0,12 % v/v. Het is onwaarschijnlijk dat de AFVL-waarde is gehaald in de relatief korte periode van 3,5 uur waarbij slechts ca. 44% van het tankvolume is ontgast, ca. 71% m/m koolwaterstoffen is verwijderd en een concentratie van 9 g C/m³, niettegenstaande de FID-meting aan boord aangaf dat de concentratie was gedaald tot van 10%LEL

- Meting C: Om de AVFL-waarde te halen zou de concentratie van 30% v/v moeten dalen tot 0,14 % v/v. Het is onwaarschijnlijk dat de AFVL-waarde is gehaald in periode waarbij slechts ca. 39% van het tankvolume is ontgast, niettegenstaande de FID-meting aan boord aangaf dat de concentratie was gedaald tot van 10%LEL
- Meting D: De AVFL-waarde is niet gehaald volgens de FID-meting; verder is slechts 44% van het tankvolume ontgast en ca. 8% m/m koolwaterstoffen verwijderd
- Meting E: De AVFL-waarde is niet gehaald volgens de FID-meting
- Meting F: De AVFL-waarde (10%LEL) is benaderd (0,15%LEL) volgens de FID-meting, wat mogelijk is op basis van een ventilatievoud van 1,1

Tijdens de ontgassing van nafta (C8) was een viertal keren sprake van uitval van de gasmotoren. Dit was te wijten aan de automatische afschakeling van het systeem bij een te hoge optredende onderdruk in de ladingtanks van het schip. Na iedere storing konden de motoren weer zonder problemen opstarten. Dit wijst erop dat de gasmotor als techniek betrouwbaar is.

Bij tankopslagbedrijven is het gebruikelijk om een gasbuffer voor de gasmotor te plaatsen. Gebruikelijke waarden variëren van 60 – 120 m³ voor vermogens van 60 – 115 kW en 1.000 m³ bij een vermogen met een vermogen van 650 kW. De leveranciers geven aan dat door verbeterd motormanagement een gasbuffer niet meer vereist is.

Bijlage 6b Uitstoot naar de lucht door dampbe- handeling

De uitstoot naar de lucht van de dampbehandelingstechniek is weergegeven in de volgende tabel. De verklaring van de kolommen is als volgt:

- Techniek: ontgassingstechniek
- Voorgaande lading: indicatie van de productvloeistof en -damp in de scheepstanks
- Afgas, VOS, benzeen, NOx, CO: concentratie aan genoemde stoffen in het afgas van de techniek
- Rookgas, NOx, CO: concentratie aan genoemde stoffen in het rookgas van de elektriciteitsgenerator

In de eerste rijen onder de kolomkoppen zijn de algemene emissiegrenswaarden en ondergrenzen vermeld volgens Bal, paragraaf 5.4.4. Aangezien de gasmotor bestemd is voor de zuivering van de afgassen en de gasmotor niet zelfstandig wordt geëxploiteerd gelden de algemene emissiegrenswaarden en niet de grenswaarden van gasmotoren voor niet-standaard brandstoffen⁹⁸.

Tabel B6.7 – Uitstoot naar de lucht van de dampbehandelingstechniek

Techniek	Voorgaande lading	Afgas				Rookgas*	
		VOS [mg/Nm ³]	Benzeen [mg/Nm ³]	NOx [mg/Nm ³]	CO [mg/Nm ³]	NOx [mg/Nm ³]	CO [mg/Nm ³]
Emissiegrenswaarde ** (ondergrens)		50 (250 kg/jr)	1 (1,25 kg/jr)	100 (1000 kg/jr)	n.v.t.	150 (500 uur/jr)	n.v.t.
VCU	Benzine	0,65	2,1	73,4	n.b.	n.b.	n.b.
Gasmotor	Pygas	25,8	1	682	n.b.	n.b.	n.b.
Gasmotor	Nafta	20,5	0,9	2.074	n.b.	n.b.	n.b.
Gasmotor	Pygas	26,4	17	1.535	n.b.	n.b.	n.b.
Gasmotor	Benzine	n.b.	n.b.	1.400	400	n.b.	n.b.
Gasmotor	Pygas	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.
Condensatie en actiefkool	Benzine	3	0	n.v.t.	n.v.t.	n.b.	n.b.
Condensatie en actiefkool	Benzine	45	n.b.	n.v.t.	n.v.t.	n.b.	n.b.
RTO, voorcondensatie	Benzine	19	0,3	2		n.b.	n.b.
Condensatie	Ethanol	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.b.	n.b.
Condensatie	Hexaan	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.v.t.	n.b.	n.b.

n.b.: niet bekend; n.v.t.: niet van toepassing

* Bal § 4.126 Kleine en middelgrote stookinstallatie voor standaard brandstoffen

** Bal artikel 5.34 (omrekenen naar zuurstof) De emissies van verbrandingsprocessen worden omgerekend naar afgas met een volumegehalte aan zuurstof van 3% bij een stookinstallatie⁹⁹ met een gasvormige brandstof.

⁹⁸ Bal § 4.127 Middelgrote stookinstallatie voor niet-standaard brandstoffen

⁹⁹ Stookinstallatie: technische eenheid waarin brandstoffen worden geoxideerd om de warmte die zo wordt opgewekt te gebruiken

Bijlage 7 Berekening van milieukosten en -baten

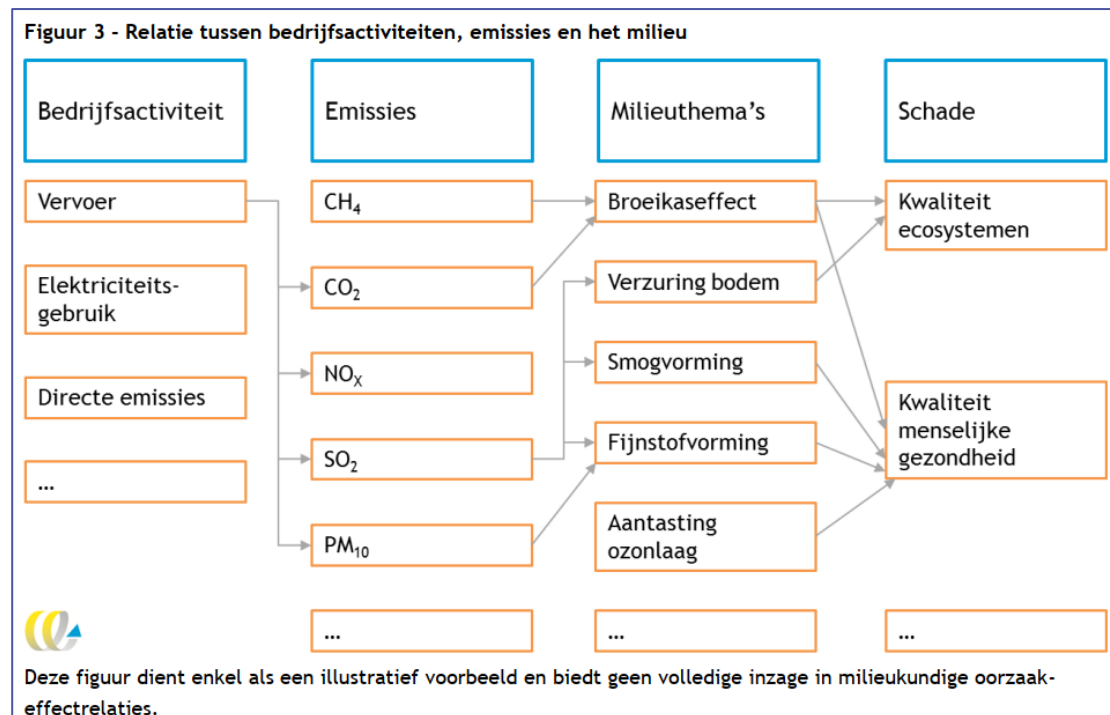
De berekening van de milieukosten en -baten is in deze bijlage als volgt toegelicht:

- Milieuprijzen
- Referentiesituatie

Bijlage 7a Milieuprijzen

Algemene toelichting

In de milieuprijzen wordt uitdrukking gegeven aan de maatschappelijke waarde van milieuvervuiling, door de impact op zoveel mogelijk aspecten mee te nemen, zoals schematisch weergegeven in de volgende figuur. De volgende effecten zijn beschouwd: klimaatverandering, ozonlaagaantasting, straling, smogvorming, (menselijke gezondheid en ecosystemen op land) fijnstofvorming, verzuring, vermisting (zoetwater en zoutwater), ecotoxiciteit (land, zoetwater, zoutwater), humane toxiciteit (kankergerelateerd en niet-kankergerelateerd), landgebruik, uitputting (mineraal, fossiel), waterverbruik, NO₂-mortaliteit, overlastschade per soort geluid (weg, spoor en luchtverkeer) in verschillende geluidsklassen vanaf 40 dB.



Figuur B7.1 – Overgenomen uit Handboek Milieuprijzen 2023, figuur 3

De milieuprijzen zijn afgeleid van het ReCiPe 2016-model (zie volgende tabel uit het Handboek milieuprijzen 2023).

Tabel 2 - Milieuprijzen voor LCA: ReCiPe 2016 midpoints in voor Nederland, €₂₀₂₁ per eenheid

	Eenheid	Onder	Centraal	Boven
Klimaatverandering	€/kg CO ₂ -eq.	€ 0,05	€ 0,13	€ 0,16
Ozonlaagaantasting	€/kg CFC-11-eq.	€ 15,2	€ 29,1	€ 69,6
Straling	€/kBq Co-60-eq.	€ 0,00275	€ 0,00422	€ 0,00594
Smogvorming, menselijke gezondheid	€/kg NO _x -eq.	€ 0,99	€ 1,70	€ 2,21
Smogvorming, ecosystemen land	€/kg NO _x -eq.	€ 0,043	€ 0,043	€ 0,153
Fijnstofvorming	€/kg PM _{2,5} -eq.	€ 101,2	€ 168,0	€ 235,0
Verzuring	€/kg SO ₂ -eq.	€ 3,38	€ 6,46	€ 10,72
Vermesting, zoetwater	€/kg P-eq.	€ 2,56	€ 5,53	€ 10,13
Vermesting, zoutwater	€/kg N-eq.	€ 7,64	€ 14,25	€ 27,60
Ecotoxiciteit, land	€/kg 1,4-DCB-eq.	€ 0,00067	€ 0,00095	€ 0,00123
Ecotoxiciteit, zoetwater	€/kg 1,4-DCB-eq.	€ 0,0218	€ 0,0309	€ 0,0400
Ecotoxiciteit, zoutwater	€/kg 1,4-DCB-eq.	€ 0,0033	€ 0,0047	€ 0,0060
Humane toxiciteit, kankerge relateerd	€/kg 1,4-DCB-eq.	€ 3,55	€ 5,25	€ 7,91
Humane toxiciteit, niet-kankerge relateerd	€/kg 1,4-DCB-eq.	€ 0,066	€ 0,097	€ 0,146
Landgebruik	€/m ² a crop-eq.	€ 0,103	€ 0,146	€ 0,189
Uitputting, mineraal	€/kg Cu-eq.	€ 0,0000	€ 0,0140	€ 0,0826
Uitputting, fossiel	€/kg olie-eq.	€ 0,000	€ 0,028	€ 0,163
Waterverbruik	€/m ³	€ 0,000	€ 0,137	€ 0,181
NO ₂ -mortaliteit*	€/kg NO _x -eq.	€ 6,30	€ 9,32	€ 14,08

* De NO₂-mortaliteit is een additionele berekeningsstap die additioneel aan de LCA-analyse kan worden uitgevoerd om de mortaliteit van NO₂ goed in de externe kostenschattingen te brengen.

Gehanteerde milieuprijzen voor luchtverontreinigende stoffen

De milieuprijzen betreffen gemiddelde prijzen in 2021 per kilogram emissie vanuit een gemiddelde bron op een gemiddelde locatie (met bijv. een gemiddelde bevolkingsdichtheid met een gemiddeld inkomen). In principe geven de milieuprijzen de maatschappelijke waarde van milieuvervuiling weer voor emissies in 2021. Deze prijzen zijn ook te gebruiken voor situaties in 2022, 2023 of 2024 (met voorbehoud van grote maatschappelijke veranderingen). Uit de meeste studies blijkt dat gezondheidsschade de grootste post is in de totale schadekosten van milieuvervuiling.

De milieuprijzen van de voor dit onderzoek relevante stoffen zijn in de volgende tabel aangegeven. De 'centrale' waarde is gehanteerd in de berekening van de milieuschade en -baten.

Tabel B7.1 – Milieuprijzen voor luchtverontreinigende stoffen [CE Delft 2023]

Stof	Milieuprijs			Referentie
	(centrale waarde) [euro2021/kg]	(onder- waarde) [euro2021/kg]	(boven- waarde) [euro2021/kg]	
Uitstoot naar lucht				
• Benzeen	0,366	0,243	0,543	Tabel 3
• CO	0,0815	0,0510	0,112	Tabel 42
• CO ₂	0,13	0,050	0,160	Tabel 1
• 1,2-dichloorpropan	46,3	28,1	69,7	Tabel 85
• Ethanol	0,271	0,167	0,382	Milieuprijentool
• Methaan - CH ₄	4,7	1,81	5,78	Tabel 1
• Niet-methaan VOS (NMVOS)	2,73	1,76	3,82	Tabel 1
• NH ₃	49,3	30,4	67,9	Tabel 1
• NOx	29,9	18,3	44,1	Tabel 1
• SO ₂	57,5	33,7	83,1	Tabel 1

Elektriciteitsverbruik en -opwekking

De uitstoot voor het opwekken van elektriciteit is gebaseerd op gegevens van het CBS en de Emissieregistratie: 0,29 CO₂ kg per kWh¹⁰⁰ en 0,0826 gram NOx per kWh¹⁰¹.

Grondstoffenverbruik

Voor verbranding (thermische oxidatie als nageschakelde techniek is ook het verbruik van fossiele brandstof van belang. De milieuprijs van verbruik van 'ruwe aardolie' en aardgas zijn respectievelijk 8,98 EUR/GJ en 4,98 EUR/GJ (als extractiekosten van fossiele brandstoffen; tabel 28 van het Handboek Milieuprijzen 2023). Deze waarden zijn gebruikt voor diesel respectievelijk propaan. De waarde voor 'ruwe aardolie' is ook gebruikt voor het teruggewonnen condensaat.

Vloeibaar maken van stikstof

De European Industrial Gas Association (EIGA)¹⁰² geeft een verbruik van 1,976 MJ/kg vloeibaar stikstof aan. Dit komt overeen met 0,549 kWh/kg vloeibaar stikstof. Gecombineerd met de vermelde waarden voor elektriciteitsopwekking (CO₂: 0,29 kg/kWh en NOx: 0,0000826 kg/kWh) komt dit overeen met 0,16 kg CO₂/kg vloeibaar N₂ en 0,000045 kg NOx/kg vloeibaar N₂.

¹⁰⁰ CBS, zie <https://www.cbs.nl/nl-nl/maatwerk/2022/05/rendementen-co2-emissie-elektriciteitsproductie-2020>. Het betreft de CO₂ emissie uit de 'integrale methode' voor zichtjaar 2020.

¹⁰¹ Dit volgt uit data uit Emissieregistratie inzake NO₂ uitstoot, gedeeld door de totale centrale/decentrale productie elektriciteit in 2020. Zie <https://opendata.cbs.nl/statline/#/CBS/nl/dataset/37823wkk/table?dl=77D3D> en Emissieregistratie, Compartment Lucht, stikstofoxiden als NO₂, zichtjaar 2020, sector 'energiesector', subsector 'opwekking elektriciteit'. Dat geeft een NO₂ emissie van 10.200.319.885 gram, gedeeld door 123.553.482 MWh. Daaruit volgt een emissie van 0,0826 gram per kWh, gemiddeld over heel Nederland.

¹⁰² The European Industrial Gas Association (EIGA) (EIGA Position Paper PP-33 – December 2010) notes that an Air Separation plant uses 1976 kJ of electricity per kilogram of nitrogen produced. The stated purity of supplied liquid nitrogen is 99.9%.

Actiefkool

In het Handboek Milieuprijzen 2023 is actiefkool niet beschouwd. Om de milieuschade voor de winning, productie en reactivatie van actiefkool te beschouwen is gebruik gemaakt van een studie¹⁰³ naar het broeikaseffect. In de studie is aangegeven dat steenkool de meest gebruikte grondstof is (paragraaf 4.1). De studie geeft de volgende uitstoot van broeikasgassen aan:

- Winning en productie: 9,5 kg CO₂-eq/kg (Table 19)
- Reactivatie: 2,1 kg CO₂-eq/kg (Table 22)

De NO_x- en CO-uitstoot is geschat aan de hand van de verhouding ten opzichte van CO₂ (in het rookgas afkomstig van aardgas) en het BBT-geassocieerde emissieniveau volgens de BBT-conclusies¹⁰⁴, overgenomen van Tabel 1.15 (gemiddelde van 4–50 mg/Nm³ voor CO en gemiddelde van 4–150 mg/Nm³ voor NO_x). Het afvalstadium is niet beschouwd evenmin als de uitstoot van toxische stoffen zoals PAK of afvalwater tijdens de productie van actiefkool.

¹⁰³ Anna Vilén; Environmental impact of activated carbon production from various raw materials, Master's Thesis; Aalto University School of Engineering; 2 Feb 2021

¹⁰⁴ UITVOERINGSBESLUIT (EU) 2022/2427 van 6 december 2022 tot vaststelling van de conclusies over de beste beschikbare technieken (BBT-conclusies) voor gangbare systemen voor gemeenschappelijk(e) behandeling en beheer van afgassen in de chemiesector

Bijlage 7b Referentiesituatie

Emissieconcentratie bij uitlaat

De uitstoot van de lucht is met de volgende uitgangspunten berekend:

- CO₂: massabalans met het aandeel koolstof (C) in de verwijderde VOS en gebruikte brandstof
- NO_x:
 - Eenvoudige naverbrander (VCU): algemene emissiegrenswaarde 100 mg/Nm³, droog 3% O₂
 - Gasmotor: emissiegrenswaarde voor gasmotor 35 mg/Nm³, droog 15% O₂
 - FTO en RTO: gemiddelde van BBT-geassocieerd emissieniveau (5-30 mg/Nm³ voor katalytische oxidatie gemiddeld 17,5) volgens tabel¹⁰⁵ 1.4 van de BBT-conclusies afgasbehandeling [EU 2022/2427]
- CO:
 - Eenvoudige naverbrander (VCU), FTO, RTO: gemiddelde van BBT-geassocieerd emissieniveau (4-50 mg/Nm³; gemiddeld 27) volgens voetnoot 3 van tabel 1.4 van de BBT-conclusies afgasbehandeling [EU 2022/2427]
 - Gasmotor: verhouding CO/NO_x volgens EURO VI voor benzinemotoren (1/0,06) x emissiegrenswaarde voor gasmotor 35 mg/Nm³, droog 15% O₂ -> 583 mg/Nm³
- VOS:
 - Dampterugwinning: emissiegrenswaarde 150 mg/Nm³
 - Eenvoudige naverbrander (VCU), FTO, RTO: algemene emissiegrenswaarde 50 mg/Nm³, droog 3% O₂
 - Gasmotor: emissiegrenswaarde voor gasmotor 500 mg/Nm³, droog 15% O₂
- Benzeen:
 - Benzine: 0,7% van VOS
 - Benzeen: 100% van VOS
- Ammoniak:
 - Gasmotor: emissiegrenswaarde voor gasmotor 5 mg/Nm³, droog 15% O₂

Overgang van condensatie naar adsorptie

Bij condensatie met adsorptie zijn de volgende stappen gemodelleerd:

- Van 100% verzadiging naar 25%LEL via condensatie
- Van 25%LEL naar 10% LEL via actiefkooladsorptie

Overgang van verbranding zonder steunbrandstof naar verbranding met steunbrandstof

De verbrandingsopties zijn vereenvoudigd gemodelleerd met de volgende stappen zonder verder onderscheid te maken tussen de verbrandingstechnieken:

- Van 100% verzadiging naar 100% LEL zonder propaan
- Van 100% LEL naar 10% LEL met propaan waarbij propaanconcentratie = 100% LEL

¹⁰⁵ Met de BBT geassocieerde emissieniveaus (BBT-GEN's) voor geleide emissies naar lucht van NO_x en indicatief emissieniveau voor geleide emissies naar lucht van CO afkomstig van thermische behandeling

Kenmerk R001-1292542RAX-V05

Opstarttijd van RTO en langere duur nodig voor verdunning

Bedrijfstijd van een RTO = 2 x bedrijfstijd van een FTO

Adsorptie:

kg VOS/kg actiefkool = 0,5

Bijlage 8 Kosteneffectiviteitsberekening

Benzine	Con+ads	VCU	FTO	Gasmotor	RTO
Bijkomende investeringen					
Eenmalige investeringen					
Kapitaalvernietiging door desinvesteringen					
Totaal investeringen	900.000	500.000	1.000.000	762.500	1.500.000
annuïteit elektromechanisch (10 jaar, 5%)	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13
Totale investeringen * annuïteit	116.554	64.752	129.505	98.747	194.257
Bouwkundige investeringen	0	0	0	0	1
annuïteit bouwkundig (25 jaar, 5%)	0,071	0,071	0,071	0,071	0,071
Bouwkundige investeringen * annuïteit	0	0	0	0	0,070952
Onderhoud					
Bediening					
Overige vaste operationele kosten	45.000	25.000	50.000	38.125	75.000
Totale vaste operationele kosten	45.000	25.000	50.000	38.125	75.000
Elektriciteit	0	0	0	1.800	0
Diesel/propanaan	0	34.676	20.531		
Ureum	0	0	0	8.500	0
Vloeibaar stikstof	1.465.632				
Actiefkool					
Reststoffenverwerking					
Overige variabele operationele kosten					
Totale variabele operationele kosten	1.465.632	34.676	20.591	44.976	20.591
Totale bruto jaarlijkse kosten	1.627.186	124.429	200.095	181.849	289.848
Productcondensaat	87.713	0	0	0	0
Elektriciteit	0	0	0	151.800	0
Totale netto jaarlijkse kosten	1.539.473	124.429	200.095	30.049	289.848
Effecten					
Jaarlijkse ongereinigde vracht	438.567	438.567	438.567	438.567	438.567
Jaarlijkse restemissie	18	918	918	27.529	1.835
Jaarlijkse emissie tijdens storingen					
Jaarlijkse emissie tijdens onderhoud					
Totale jaarlijkse restemissie	18	918	918	27529	1835
Totale jaarlijkse emissiereductie	438.549	437.650	437.650	411.038	436.732
Kosteneffectiviteit					
kosteneffectiviteit (euro/kg)	3,5	0,3	0,5	0,1	0,7